

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**TEPELNÁ ZTRÁTA VODNÍHO
AKUMULAČNÍHO ZÁSOBNÍKU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaclík** Jméno: **Rudolf** Osobní číslo: **483944**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
 Studijní program: **Technika prostředí**
 Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Tepelná ztráta vodního akumulačního zásobníku

Název diplomové práce anglicky:

Heat Loss of a Water Storage Tank

Pokyny pro vypracování:

Analýzujte experimentálně tepelnou ztrátu vodních akumulačních zásobníků o různém objemu v závislosti na různém napojení potrubí a různém podílu tepelných mostů. Vyhodnoťte nárůst tepelné ztráty při různých teplotách zásobníku. Vytvořte výpočetní model pro stanovení tepelné ztráty zásobníku se zahrnutím tepelných mostů vlivem napojení ověřený výsledky experimentů. Odvoďte přibližný vztah pro zohlednění vlivu napojení potrubí na tepelnou ztrátu zásobníku tepla.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 12897 – Zásobování vodou – Nepřímo ohřívání uzavřené zásobníkové ohříváče vody, ÚNMZ 2017.
 ČSN EN 60379:2004 Metody měření funkce elektrických akumulačních ohříváčů vody pro domácnost a podobné účely, ÚNMZ 2004
 ČSN EN 15332 Kotle pro ústřední vytápění – Stanovení energetické náročnosti zásobníků na teplou vodu, ÚNMZ 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D. ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

 doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.
 podpis vedoucí(ho) práce

 doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
 podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

 doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
 podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

 Datum převzetí zadání

 Podpis studenta

SOUHRN

Tato diplomová práce se zabývá problematikou tepelných ztrát vodních akumulčních zásobníků. Cílem této práce je popsat vodní zásobníky, zmínit různé možnosti jejich konstrukce a zjistit vliv těchto modifikací na jeho tepelnou ztrátu. Dalším účelem této diplomové práce je zorientovat se v normách, podle kterých se tepelná ztráta vodních zásobníků tepla stanovuje a porovnat je mezi sebou. Dalším cílem je popsat dodatkové tepelné ztráty vodních akumulčních zásobníků, konkrétně se jedná o tepelné mosty a vnitřní recirkulaci v potrubí. Tyto ztráty vznikají na připevněných ventilech a trubkách k zásobníku. V druhé části práci se provede stanovení tepelné ztráty dvou vodních akumulčních zásobníků experimentem, v tomto měření bude zkoumán nárůst tepelné ztráty při různých teplotách a různém osazení. Závěrečným cílem je vytvořit výpočetní model, stanovující tepelnou akumulčních zásobníků při různých podmínkách. Ten se seřídí pomocí výsledků z předešlého experimentu. Dále bude výpočet celého modelu zjednodušeně zapsán pomocí vzorce, jehož vstupy budou teplotní rozdíl ΔT , počet připevněných ventilů n a počet připevněných trubek k a výstupem tepelná ztráta akumulčního vodního zásobníku Φ .

SUMMARY

This thesis deals with the issue of thermal losses in water storage tanks. The objective of this thesis is to describe water storage tanks, mention various construction options, and determine the impact of these modifications on their thermal losses. Another aim of this thesis is to familiarize oneself with the norms used to determine the thermal losses of water storage tanks and compare them among each other. Next goal is to describe additional heat losses in water storage tanks, specifically thermal bridges and internal recirculation in pipelines. These losses occur at attached valves and pipes connected to the storage tank. In the second part of the thesis, the thermal loss of two water storage tanks will be determined through experiment. In this phase, the focus will be on examining the increase in thermal loss at different temperatures and with different configurations. The final objective is to develop a computational model that calculates the thermal losses of water storage tanks under different conditions. This model will be calibrated using the results from the previous experiment. Furthermore, the calculation of the entire model will be simplified using a formula, with inputs including the temperature difference T , the number of attached valves n , the number of attached pipes k , and the output being the thermal loss of the water storage tank Φ .

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „tepelná ztráta vodního akumulčního zásobníku“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Tomáše Matušky, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce.

V Praze dne:

Bc. Rudolf Vaclík:

.....

.....

PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl poděkovat doc. Ing. Tomášovi Matuškoví, Ph.D. za odborné vedení, pomoc při měření, vstřícnost, ochotu, cenné připomínky a rady při psaní této diplomové práce.

Dále bych chtěl moc poděkovat své rodině a svým blízkým, kteří mě po celou dobu magisterského studia podporovali. Konkrétně bych chtěl poděkovat Haně Vaclíkové za podporu v nelehkých chvílích, Janu Vaclíkovi za cenné rady do života, Antonínu Vaclíkovi za hodnotné připomínky týkající se studia na FS ČVUT, Haně Jerhotové, která mi byla vždy ve všem oporou, a Michelangelovi za jeho přítulnost v závěru mého studia.

Také bych chtěl poděkovat všem kolegům z magisterské studijní skupiny, za podporu a spolupráci při vypracovávání náročných projektů v průběhu studia.

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Vodní zásobníky tepla.....	8
2.1 Rozdělení podle teplosměnné plochy.....	9
2.1.1 Akumulační nádoba.....	10
2.1.2 Monovalentní zásobník tepla.....	10
2.1.3 Bivalentní zásobník tepla	11
2.1.4 Trivalentní a vícevalentní zásobník tepla.....	12
2.2 Rozdělení podle periody akumulace	12
2.3 Teplotní vrstvení objemu zásobníku	14
2.3.1 Aktivní stratifikační vestavba.....	15
2.3.2 Pasivní stratifikační vestavba	15
2.4 Materiály zásobníků tepla	16
2.4.1 Ocelové zásobníky tepla.....	16
2.4.2 Plastové zásobníky tepla	17
2.5 Tepelná izolace zásobníků tepla.....	18
3. Stanovení tepelné ztráty zásobníku tepla.....	20
3.1 Stanovení tepelné ztráty výpočtem	20
3.1.1 Tepelná ztráta pláštěm zásobníku.....	21
3.1.2 Tepelná ztráta dna a víka zásobníku tepla.....	21
3.1.3 Vliv tloušťky izolace na tepelnou ztrátu	22
3.1.4 Vliv teploty vody na tepelnou ztrátu	24
3.2 Stanovení tepelné ztráty dle norem	27
3.2.1 ČSN EN 12897.....	28
3.2.2 ČSN EN 60379	31

3.2.3	ČSN EN 15332.....	33
3.2.4	ČSN EN 12977.....	36
3.2.5	Porovnání ČSN EN 12897, ČSN EN 60379, ČSN EN 15332 a ČSN EN 12977	38
4.	Dodatkové tepelné ztráty.....	39
4.1	Tepelné mosty	39
4.1.1	Výpočet podle ČSN EN ISO 12241	40
4.1.2	Stanovení tepelné ztráty ventilu	41
4.1.3	Vliv teploty na tepelnou ztrátu ventilu	42
4.2	Tepelné ztráty vnitřní recirkulací v potrubí	44
4.2.1	Tepelné pasti.....	45
4.2.2	Porovnání tepelných pastí	49
5.	Energetické štítky pro zásobníky teplé vody	51
5.1	Vliv objemu zásobníku tepla na tepelnou ztrátu	53
5.1.1	Nařízení komise (EU) č. 814/2013.....	53
5.1.2	Výpočet vlivu objemu na tepelnou ztrátu.....	55
6.	Stanovení tepelné ztráty experimentem	59
6.1	Popis měřených vodních zásobníků tepla	59
6.1.1	Zásobník 398 l.....	59
6.1.2	Zásobník 282 l.....	61
6.2	Příprava měření	63
6.3	Postup měření.....	63
6.4	Stanovení tepelné ztráty	65
6.4.1	Výsledky tepelné ztráty zásobníku 398 l.....	66
6.4.2	Výsledky tepelné ztráty zásobníku 282 l.....	68
7.	Výsledný výpočetní model	71
7.1	Samotný zásobník	71

7.1.1	Výsledný výpočetní model zásobník 398 l.....	73
7.1.2	Výsledný výpočetní model – zásobník 282 l.....	75
7.2	Zásobník tepla s ventily	75
7.2.1	Výsledný výpočetní model s ventily	76
7.3	Zásobník tepla s trubkami	76
7.3.1	Výsledný výpočetní model s přidanými trubkami	77
7.4	Výsledný zjednodušený vzorec	78
8.	Závěr	80
9.	Literatura.....	81
10.	Přílohy	87

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Symbol	Jednotka	Význam
A	m^2	plocha
c	$J/kg \cdot K$	měrná tepelná kapacita
C	kJ/K	tepelná kapacita
E	kWh	spotřebovaná elektrická energie
h	$W/m^2 \cdot K$	součinitel přestupu tepla
H	m	výška zásobníku
L	m	charakteristický rozměr
m	kg	hmotnost
Q	J, kWh	teplo, ztráta tepla
r	m	poloměr
R	$m^2 \cdot K/W$	tepelný odpor materiálu
t	s	čas
T	$^{\circ}C$	teplota
UA	W/K	měrná tepelná ztráta
V	l	objem
δ	m	tloušťka vrstvy materiálu
Δ	-	rozdíl
ε	-	emisivita
φ	-	součinitel osálení
Φ	W	tepelná ztráta
λ	$W/m^2 \cdot K$	součinitel tepelné vodivosti
Nu	-	Nusseltovo číslo
ρ	kg/m^3	hustota
σ	$W/m^2 \cdot K^4$	Stefan-Boltzmannova konstanta

SEZNAM INDEXŮ

<i>0</i>	původní
<i>1</i>	plášť
<i>2</i>	víko
<i>3</i>	dno
<i>24</i>	za 24 hodin
<i>A</i>	Akumulační látky
<i>A1</i>	vypnutí termostatu na začátku zkoušky
<i>Ai</i>	vypnutí termostatu
<i>ai</i>	spodní hranice
<i>An</i>	vypnutí termostatu na konci zkoušky
<i>Amb</i>	okolního vzduchu
<i>i</i>	pořadí vrstvy
<i>e</i>	na vnější straně
<i>E</i>	energetického štítku
<i>Ei</i>	sepnutí termostatu
<i>ei</i>	horní hranice
<i>Izol</i>	izolace
<i>k</i>	konvekci
<i>M</i>	průměrná
<i>MA</i>	průměrná spodní hranice
<i>ME</i>	průměrná horní hranice
<i>pd</i>	povrchu dna
<i>Pp</i>	povrchu podlahy
<i>TM</i>	tepelného mostu

<i>S</i>	sáláním
<i>V</i>	ventil
<i>W</i>	vody
<i>zk</i>	zkoušky

1. Úvod

Tepelná ztráta zásobníků tepla je v současné době jediným parametrem zohledňujícím energetickou náročnost akumulace udávaným na jejich energetickém štítku. Tepelná ztráta ovlivňuje účinnost akumulace tepla a tím i energetickou náročnost celé tepelné soustavy. Pro zjišťování tepelné ztráty se upřednostňuje její experimentální stanovení zkouškou podle normového postupu při definovaném rozdílu mezi teplotou vody v zásobníku a teplotou vzduchu v jeho okolí. Na základě výsledku zkoušky se potom zásobník tepla zařadí do příslušné energetické třídy a tepelná ztráta pro normový rozdíl teplot se uvede na energetickém štítku.

Při normovém zkoušení tepelné ztráty zásobníku tepla jsou všechny vývody a přípojovací nátrubky zásobníku tepla uzavřeny, zatěsněny a kvalitně zaizolovány, aby výsledek nebyl zhoršen vlivem dodatkových tepelných ztrát. To však v praxi není reálné, neboť k tepelné soustavě i k rozvodu studené a teplé vody je zásobník připojen uzavíracími ventily a potrubím. Ventily, které většinou nejsou opatřeny tepelnou izolací, jsou místem, kde vznikají tepelné mosty. Tyto tepelné mosty ventilů mohou představovat významnou část tepelné ztráty. V připojeném potrubí pak může v době mimo proudění teplotnosné látky vznikat nežádoucí vnitřní recirkulace v potrubí. Toto přirozené proudění vyvinuté mezi teplým objemem zásobníku a vychlazeným objemem v trubkách mimo zásobník může značně navýšit tepelnou ztrátu zásobníku.

Diplomová práce se ve své teoretické části zabývá problematikou vodních akumulačních zásobníků, teoretickým a experimentálním stanovením tepelných ztrát a tepelnými mosty a opatřeními pro jejich zabránění. V praktické části jsou na dvou různých zásobnících tepla provedeny experimenty. Nejprve je tepelná ztráta stanovena pro dokonale zaizolovaný akumulační zásobník, poté pouze s nainstalovanými uzavíracími ventily na všech nátrubcích, a nakonec se dvěma či čtyřmi připojenými trubkami, které byly napojeny buď vodorovně, ohnuté nahoru, či dolů. V každém případě byly zkoumány minimálně dvě teplotní hladiny a vliv teploty vody uvnitř zásobníku na jeho tepelnou ztrátu. V další části práce byly vytvořeny výpočetní modely, které tepelnou ztrátu těchto vodních zásobníků s různě provedenými tepelnými mosty stanovují výpočtem. V závěru je uveden zjednodušený vzorec podle těchto modelů, pomocí kterého lze tepelnou ztrátu obecného vodního akumulačního zásobníku obecně predikovat při znalosti počtu nátrubků, velikosti ventilů a napojených trubek predikovat.

2. Vodní zásobníky tepla

Vodní zásobníky tepla umožňují dočasné ukládání tepla. Uložená tepelná energie může být s odstupem času opět využita. Vodní zásobníky tepla se používají v mnoha různých aplikacích, například v rodinných domech, bytových budovách, průmyslových podnicích, obchodních center a dalších.

Zásobníky tepla jsou také neodmyslitelnou součástí systémů využívajících obnovitelné zdroje energie, jako jsou například solární systémy či tepelná čerpadla. Tyto systémy produkují teplo v určitých intervalech efektivněji, což vytváří potřebu jeho skladování [1]. Použití zásobníků tepla tak zvyšuje energetickou efektivitu takových systémů.

Vodní zásobníky tepla se dělí na 3 základní skupiny podle účelu použití. Konkrétně se toto zařízení dá používat jako:

- Zásobník teplé vody.
- Zásobník otopné vody.
- Kombinovaný zásobník tepla.

Zásobníky tepla využívají akumulaci citelného tepla. Při tomto procesu se tepelná energie ukládá pomocí změny teploty akumulační látky, která může být zpravidla kapalná nebo pevná. U kapalných akumulačních látek se jedná hlavně o vodu a její příměsi s glykolem. Pevné akumulační látky jsou například kameny, beton či keramické desky [2].

Množství tepla Q [J], které může materiál akumulovat, závisí na rozdílu mezi počáteční a konečnou teplotou akumulační látky, její hmotností a tepelné kapacitě podle vztahu

$$Q = m_A \cdot c_A \cdot \Delta T_A = \rho_A \cdot c_A \cdot V_A \cdot \Delta T_A \quad (2.1)$$

kde je

m_A hmotnost akumulární látky [kg],

c_A průměrný součinitel tepelné kapacity akumulární látky mezi teplotami T_1 a T_2 [J/kg·K],

ΔT_A rozdíl mezi počáteční a konečnou teplotou akumulární látky [K],

ρ_A hustota akumulární látky [kg/m³],

V_A objem akumulární látky [m³].

Pro uchování velkého množství tepelné energie by ideální akumulární látka měla mít vysokou hustotu, vysokou tepelnou kapacitu a měla by snést velký teplotní rozdíl. Důležitá je také dostupnost této látky, cena a také to, aby nebyla toxická a výbušná [4].

Akumulární zásobníky pro technickou praxi zpravidla používají jako akumulární látku vodu. Voda je dobře dostupná, levná, netoxická, nevýbušná látka, má také výborné vodivé vlastnosti a vysokou měrnou tepelnou kapacitu ($c = 4182$ J/kg·K). Využívání vody jako akumulární látky má také některé nevýhody jako je například korozivita, malé povrchové napětí (hrozí úniky netěsnostmi) a omezený teplotní pracovní rozdíl (0 až 100 °C) [4] [5].

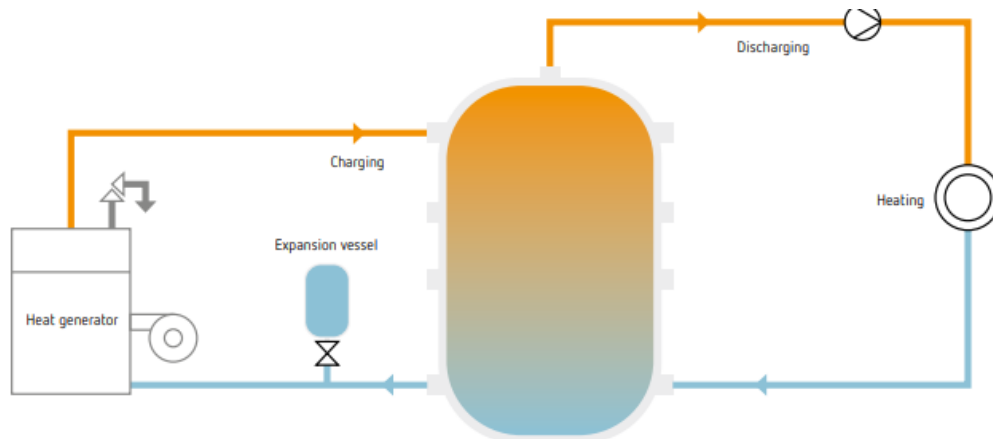
2.1 Rozdělení podle teplosměnné plochy

Podle teplosměnné plochy se zásobníky tepla dělí do 4 skupin:

- Akumulární nádoba.
- Monovalentní zásobník tepla.
- Bivalentní zásobník tepla.
- Trivalentní a vícevalentní zásobník tepla.

2.1.1 Akumulační nádoba

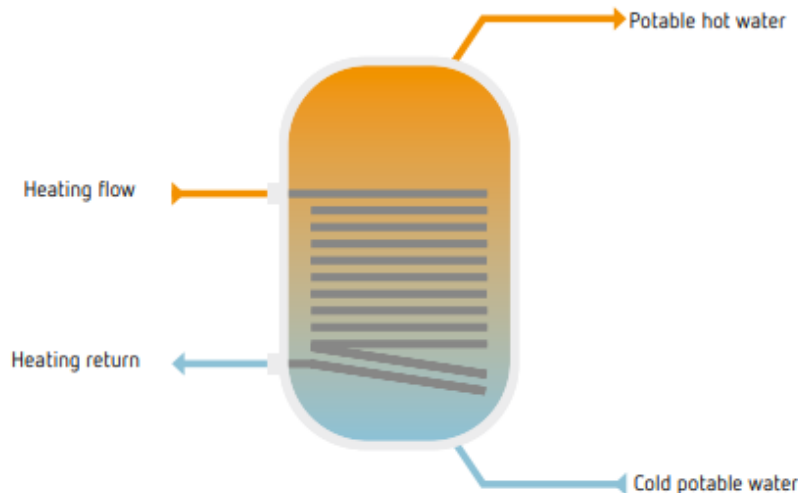
Tento typ vodního zásobníku tepla je konstrukčně nejjednodušší. Nemá totiž žádný výměník tepla uvnitř svého pláště. Akumulační nádoba se často používá jako zásobník otopné vody (viz obr. 2.1), kdy teplo je ukládáno zdrojem tepla (nabíjení) a s určitým časovým odstupem je teplo odebíráno do otopné soustavy (vybíjení). [5][6].



Obrázek 2.1 – Schéma akumulace tepla [6]

2.1.2 Monovalentní zásobník tepla

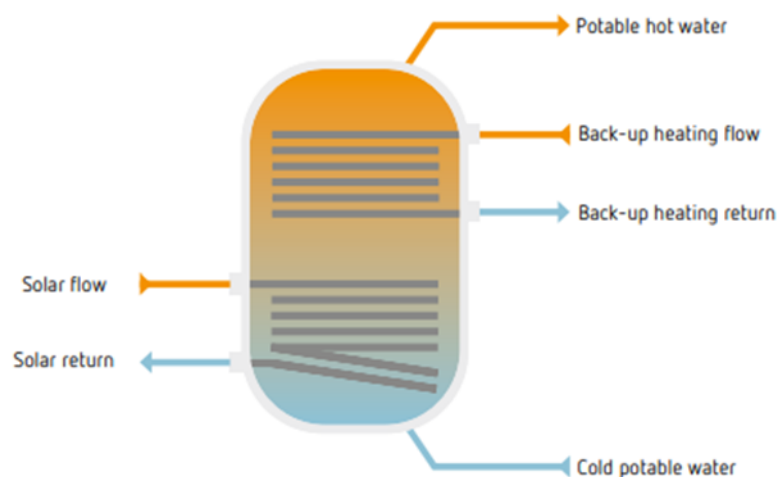
Monovalentní zásobník tepla značí, že pro přívod tepla (nebo jeho odvod) je použita jedna teplosměnná plocha. Tento typ zásobníku se často používá jako zásobník teplé vody, do kterého se přivádí teplo pro ohřev přes teplosměnnou plochu a nátrubky v plášti slouží pro přívod studené pitné vody, odvod teplé vody případně je do dalšího nátrubku zaústěno cirkulační potrubí. V tomto provedení se oproti akumulaci nádrží nemíchá teplá voda z okruhu od zdroje tepla s přiváděnou pitnou vodou. Výměník tepla uvnitř zásobníku může být obyčejný trubkový nebo může být vybaven žebry. Žebrování trubek poskytuje vyšší plochu výměníku a zajišťuje lepší přenos tepla. Schéma tohoto zásobníku je na obr. 2.2 [5][6].



Obrázek 2.2. - Schéma monovalentního zásobníku tepla [6]

2.1.3 Bivalentní zásobník tepla

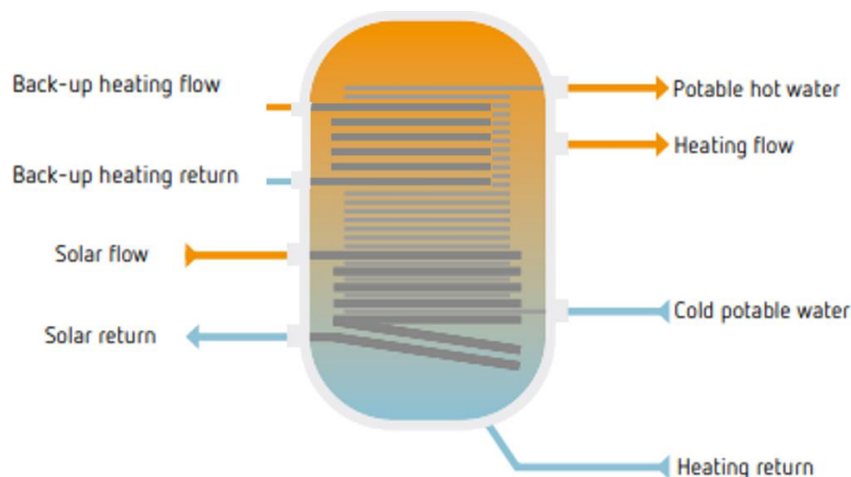
Tento typ zásobníků tepla je podobný monovalentnímu provedení. Vodní objem zásobníku je u tohoto typu ohřívána dvěma tepelnými výměníky. Ty mohou být jako u monovalentního zásobníku vybaveny žebry pro zajištění lepšího přenosu tepla. S tímto typem vodního zásobníku tepla lze v systému využít více druhů tepelných zdrojů a používá se například pro solární systémy, kde výměník v dolní části slouží pro přívod tepla ze solárních kolektorů a výměník v horní části pro ohřev objemu na požadovanou teplotu (viz obr. 2.3) [5][6].



Obrázek 2.3 - Schéma bivalentního zásobníku tepla [6]

2.1.4 Trivalentní a vícevalentní zásobník tepla

Provedení trivalentního zásobníku tepla je oproti výše zmíněným typům složitější. Jedná se zpravidla o kombinovaný zásobník tepla, to znamená, že plní funkci jako zásobník teplé vody tak zásobník otopné vody. V zásobníku tepla jsou umístěny 3 a více výměníky, které mohou být samostatné trubkové nebo žebrované. Stejně jako u bivalentního provedení lze s tímto zařízením využít více druhů tepelných zdrojů. Možností, jak uspořádat výměníky tepla v trivalentních a vícevalentních zásobnících je více. Jednou z možností je jako u bivalentního zásobníku využívat dva druhy tepelných zdrojů k ohřátí vody uvnitř zásobníku, k tomu slouží dva výměníky tepla (v obr. 2.4 nalevo). Třetí výměník je určen k přípravě teplé vody (v obr. 2.4 vpravo). Tím se dosáhne oddělení různých odběrových okruhů v jednom zásobníku tepla (viz obr. 2.4) [6].



Obrázek 2.4. - Schéma trivalentního zásobníku tepla [6]

2.2 Rozdělení podle periody akumulace

Hlavním účelem vodního zásobníku tepla je akumulovat tepelnou energii při špičkách produkce energie, a naopak jí odevzdávat, když je po ní vysoká poptávka. Doba mezi produkcí a poptávkou tepelné energie se v různých systémech liší. Proto se zásobníky dělí podle periody akumulace na:

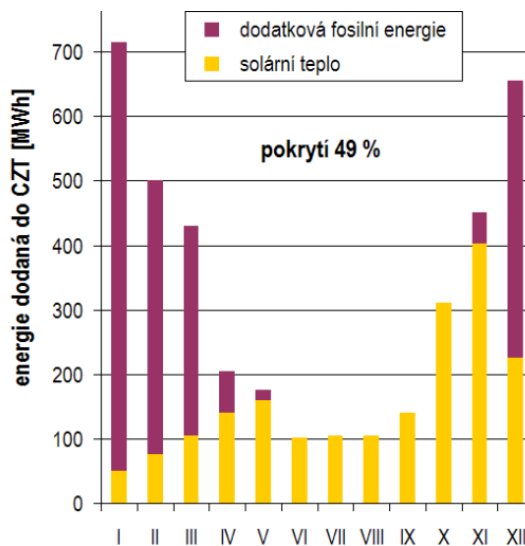
- Krátkodobé zásobníky.
- Dlouhodobé zásobníky.

a) Krátkodobé zásobníky

Tyto zásobníky jsou uzpůsobeny pro systémy, které požadují akumulaci v rámci hodin, maximálně dnů. Špička produkce tepelné energie solárním systémem na denní bázi je obvykle kolem poledne, z důvodu, že v poledne jsou nejvyšší solární zisky. Nejvyšší poptávka teplé vody nastává obecně pro rodinné a bytové domy nejvíce ráno a večer. Krátkodobé skladování je proto nutné k překlenutí této časové mezery a k využití maximálního pokrytí potřeb v domácnosti v tomto případě solárním systémem [5][7].

b) Dlouhodobé zásobníky

Dlouhodobé zásobníky jsou uzpůsobeny pro akumulaci sezónního tepla. Běžně se jedná systémy využívající centralizované zásobování teplem se solární soustavou. Na roční bázi má solární produkce největší potenciál během léta, kdy jsou požadavky na vytápění prostoru nízké nebo dokonce žádné. Sezónní skladování poskytuje řešení pro skladování přebytečné tepelné energie vyrobené v létě pro účely vytápění v zimním období, kdy solární zisky nejsou tak významné. Bez akumulace tepla se sezónní pokrytí potřeb solárním teplem pohybuje kolem 5 % naopak s dlouhodobými zásobníky se pohybuje až do 50 % (viz obr. 2.5). Vodní dlouhodobé zásobníky jsou obecně nádrže o velkých rozměrech z železo betonové konstrukce, či zeminy[7][8].

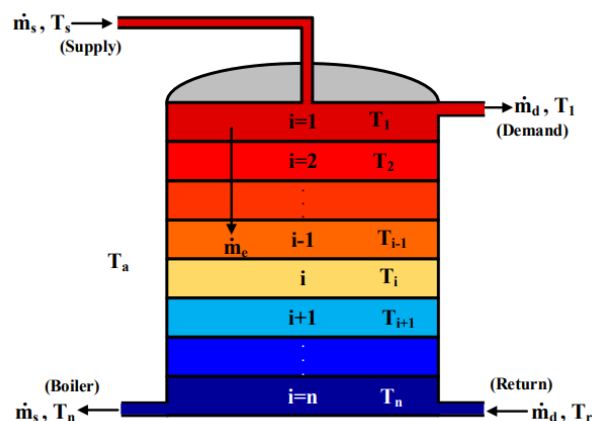


Obrázek 2.5. - Ukázka sezónního pokrytí potřeb tepla s dlouhodobým zásobníkem [8]

2.3 Teplotní vrstvení objemu zásobníku

Pro zvýšení využití akumulované energie se využívají zásobníky s teplotním vrstvením (stratifikací). Teplotní stratifikací se rozumí rozvrstvení objemu vody v zásobníku do vrstev o stejné nebo podobné teplotě. Stratifikace funguje na principu rozdílu hustot vrstev o různých teplotách. Hustota teplé vody je nižší než hustota studené vody a na vrstvy o různých teplotách proto působí různé síly. V důsledku toho vzniká vrstva teplé vody u víka zásobníku a studené vody na dně nádrže. Úroveň stratifikace závisí na:

- Rozměrech zásobníku (poměr výšky k šířce, štíhlost).
- Umístění přívodů a odvodů.
- Rychlostech proudění vstupujících a vystupujících proudů.
- Délkách dob nabíjení, ukládání a vybíjení.
- Vedení tepla akumulací látkou v zásobníku.
- Vedení tepla stěnami zásobníku [3] [9].



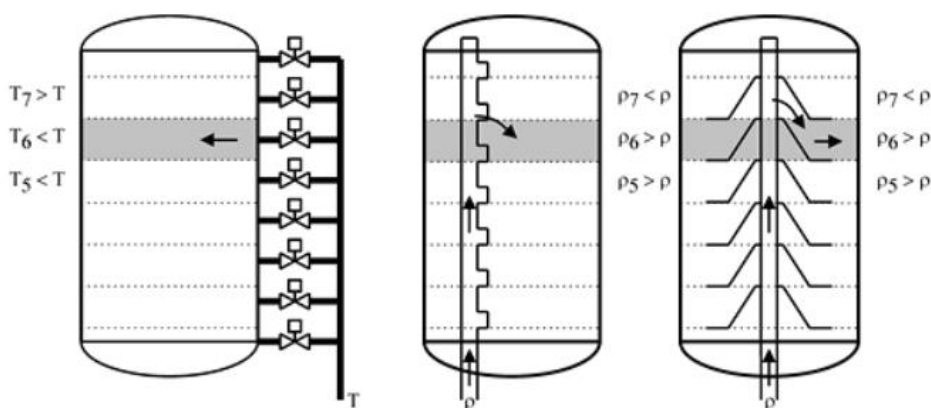
Obrázek 2.6 - Ukázka stratifikace ve vodním zásobníku [9]

V nejjednodušším případě se používá vertikální válcová nádrž s přívodem a odběrem teplé vody na vrcholu a přívodem a odběrem studené vody na dně (viz obr. 2.6). Teplá a studená voda v zásobníku jsou obvykle na začátku rozděleny do dvou vrstev oddělených smíšenou vrstvou. Takto umístěné přívody a odvody do zásobníku fungují spolehlivě, pokud zdroj tepla vždy přivádí vodu o stejné teplotě. Pokud je zásobník tepla napojen na solární kolektory, které dodávají do zásobníku z důvodu rozdílných klimatických podmínek vodu o různých teplotách, je vhodné realizovat systém

řízeného vrstvení pomocí stratifikačních vestaveb. Řízené vrstvení je způsob, jak dosáhnout lepší stratifikace vody při nabíjení zásobníku, a to tak, aby byla z výměníku tepla voda o dané teplotě přivedena přímo do vrstvy se stejnou teplotou (hustotou). Tím se mísení vody o různých teplotách zamezí a stratifikace vody se zefektivní [9] [10].

Existují 2 základní druhy stratifikačních vestaveb:

- Aktivní
- Pasivní



Obrázek 2.7 - Vlevo znázornění aktivní stratifikační vestavby uprostřed a vpravo pasivní stratifikační vestavby [10]

2.3.1 Aktivní stratifikační vestavba

Znázornění aktivní stratifikační vestavby lze vidět na obr. 2.7 vlevo. V zásobníku tepla jsou rozmístěna čidla teplot v různých výškách. Teplota přiváděné vody je také změřena. Při přívodu ohřáté vody se regulací otevře takový kohout, aby byla voda přivedena přímo do vrstvy se stejnou (nebo podobnou) teplotou. Tento druh stratifikační vestavby se využívá hlavně při rozdělení akumulací látky do více zásobníků. U tohoto typu stratifikační vestavby je nutná potřeba regulace a elektrické energie [10].

2.3.2 Pasivní stratifikační vestavba

Existuje jednodušší způsob, jak dosáhnout stratifikace vody v zásobníku bez potřeby regulace a elektrické energie. Jedná se o samočinné trubkové vestavby, které jsou většinou z plastu. Využívají rozdílu v hustotě mezi ohřátou vodou přiváděnou od zdroje tepla a hustotou vrstev v zásobníku. Voda o hustotě ρ je přiváděna vždy pod vrstvu, která má nižší hustotu, tudíž i vyšší teplotu. Tento typ stratifikační vestavby je znázorněn na obr. 2.7 uprostřed a vlevo [10].

U obou typů stratifikačních vestaveb je klíčové udržet pomalou rychlost proudu přiváděné vody v rozvodné svislé trubce pod 0,1 m/s, aby nedošlo k narušení teplotního rozvrstvení kvůli kinetické energii vodního proudu [10] a zároveň zajistit lehké plovoucí zpětné klapky na výustkách, aby nedocházelo k přimíchávání chladnější vody do rozvodné trubky.

2.4 Materiály zásobníků tepla

Materiál, ze kterého je zásobník tepla vyroben, by měl splňovat následující vlastnosti: nízká cena, vysoká pevnost materiálu, odolnost vůči korozi. Z pravidla se pro konstrukci krátkodobých vodních zásobníků tepla využívá ocel nebo plast.

2.4.1 Ocelové zásobníky tepla

Ocelové zásobníky tepla jsou nejrozšířenějším typem. Ocelové zásobníky tepla jsou velmi pevné, a tak dokážou snášet vysoké tlaky v nádobě. Nevýhodou používání konstrukční oceli je, že není odolná vůči korozi. Tento problém je řešen v mnoha případech buď smaltováním vnitřní strany nádrže [11] nebo použitím nerezové oceli. Další nevýhodou je vysoký součinitel tepelné vodivosti λ [W/m·K] a s tím spojený i nízký tepelný odpor R [m²·K/W] (viz tab. 2.1), neboť tloušťka stěny se z pravidla pohybuje v řádu mm. Tepelný odpor stěny se stanoví podle vztahu

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (2.2)$$

kde je

δ tloušťka vrstvy materiálu [m],

λ součinitel tepelné vodivosti materiálu [W/m·K] [12].

Tabulka 2.1. - Tepelné odpory kovových materiálů využívaných pro konstrukci zásobníků [13] – [16]

Materiál	λ [W/m·K]	δ [m]	R [m ² ·K/W]
Konstrukční ocel (S235 JR)	51	0,003	$5,9 \cdot 10^{-5}$
Konstrukční ocel (S235 JR)	58		$5,2 \cdot 10^{-5}$
Nerezová ocel (316L)	15		$1,3 \cdot 10^{-4}$
Hliníková slitina (6061)	240		$1,7 \cdot 10^{-5}$
Měděná slitina (C1100)	391		$7,7 \cdot 10^{-5}$

Tepelný odpor kovových materiálů se může lišit vzorek od vzorku. Záleží na složení jednotlivého materiálu. Proto je třeba brát hodnoty v tepelného odporu v tab. 2.1 s nadhledem.

2.4.2 Plastové zásobníky tepla

Plastové zásobníky tepla jsou poměrně nové zařízení na trhu. Vyvinula ho německá firma Roth. Konkrétně se jedná o plast vyztužený uhlíkovými vlákny (CFRP). Díky vyztužení nabývá plast vysoké pevnosti. Hlavní výhodou tohoto materiálu je jejich nízká hmotnost ve srovnání s podobně robustními, ale těžšími kovy. Další výhodou je výborná odolnost proti korozi [17]. Dalším přínosem plastových zásobníků je, že mají oproti kovovým materiálům výrazně vyšší tepelný odpor stěny. To přispívá k nižším tepelným ztrátám zásobníku. Výhodou vysokého tepelného odporu je také omezení degradace teplotního vrstvení uvnitř zásobníku díky omezení vertikálního vedení tepla stěnou zásobníku mezi jednotlivými vrstvami vodního objemu [18].

Tabulka 2.2. - Porovnání tepelných odporů plastových materiálů využívaných pro konstrukci zásobníků [18][19]

Materiál	λ [W/m·K]	δ [m]	R [m ² ·K/W]
CFPR podél vláken	75	0,003	$4,0 \cdot 10^{-5}$
CFPR napříč vlákny	5		$6,0 \cdot 10^{-4}$
PPR	0,22		$1,4 \cdot 10^{-2}$

Z tabulky 2.2 je zřejmé, že tepelný odpor materiálu CFPR je výrazně závislý na směru vláken. Napříč vlákny nabývá vyššího tepelného odporu než všechny kovové materiály, v podélném směru se tepelný odpor tohoto materiálu výrazně sníží. Také je nutné zmínit plastový materiál PPR. Zásobník používající tento materiál by nabýval tepelných odporů, které jsou o řády vyšší [18].

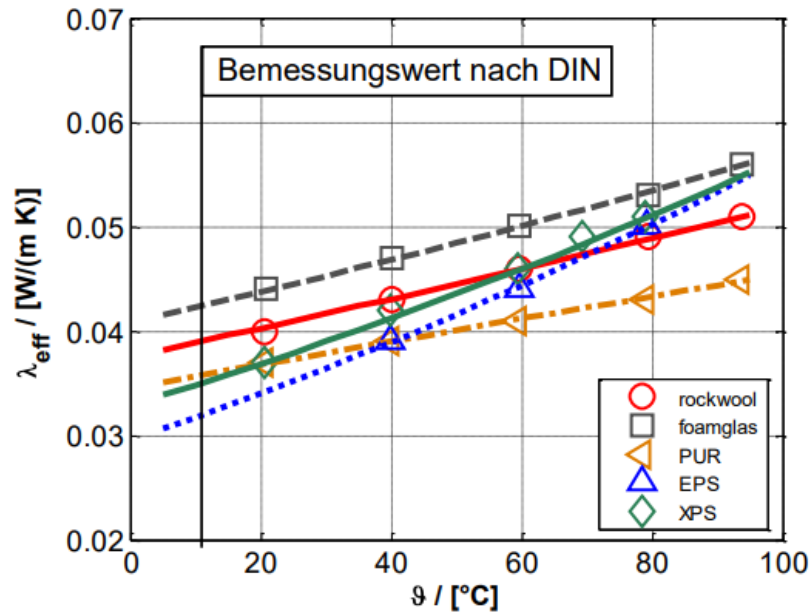


Obrázek 2.8 - Ukázka výroby vodního zásobníku z materiálu CFPR [17]

2.5 Tepelná izolace zásobníků tepla

Jedním z hlavních parametrů zásobníků tepla je jejich tepelná ztráta. Ta by měla být pro efektivní použití zásobníků v systémech co nejnižší. Z hlediska tepelné ztráty zásobníků má rozhodující vliv materiál izolační vrstvy a její tloušťka. Tepelně izolační vlastnost materiálu se popisuje tepelným odporem vrstvy, daným tloušťkou a tepelnou vodivostí. Součinitele tepelné vodivosti musí mít izolační materiál mít dostatečně nízký, navíc by neměl být příliš závislý na okolních podmínkách, jako je teplota a vlhkost okolí. Izolační materiály také musí mít dlouhou životnost a nízkou pořizovací cenu. Dříve byla velmi často jako tepelněizolační materiál využívána minerální vlna (skelná a kamenná). V dnešní době se běžně jako izolační materiál používá:

- Tvrdá polyuretanová pěna (PUR).
- Polyesterová vlákna (PES).
- Pěnový polystyren (EPS či XPS).
- Kamenná vlna
- Palmová vlákna.
- Vakuová izolace (pro specifické aplikace) [20][21].



Obrázek 2.9 - Porovnání součinitele tepelné vodivosti λ různých izolačních materiálů [22]

Obrázek 2.9 zobrazuje hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ pro různé tepelně izolační materiály v závislosti na teplotě. Při zvýšení teploty z 20 °C na 60 °C se součinitel tepelné vodivosti může zvýšit až o 15 %.

Tabulka 2.3. - Porovnání tepelných odporů různých izolačních materiálů při 40 °C [22]-[25]

Materiál	λ [W/m·K] při 40 °C	δ [m]	R [m ² ·K/W] při 40 °C
PUR (60 kg/m ³)	0,032	0,1	3,16
PUR (40 kg/m ³)	0,041		2,42
Vlna	0,040		2,53
PES	0,048		2,11
EPS	0,042		2,38
XPS	0,041		2,44
Palmová vlákna	0,045		2,25
Vakuum	0,036		2,78

Tabulka 2.3 zobrazuje součinitel tepelné vodivosti a tepelný odpor různých izolačních materiálů při teplotě 40 °C a při uvažované šířce (tloušťce) izolačního materiálu 10 cm. Z tabulky 2.3 je zjevné, že hodnota součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů je velmi nízká. Pohybuje se pro všechny vybrané materiály pod hodnotou 0,045 W/m·K. Tepelný odpor izolačních materiálů se může lišit podle jejich konkrétního složení. Promítnout se může i stárání, stlačení izolační vrstvy, či okolní vlhkost. Proto je třeba brát hodnoty z tabulky 2.3 s nadhledem [23].

Stanovení tepelné ztráty zásobníku tepla

2.6 Stanovení tepelné ztráty výpočtem

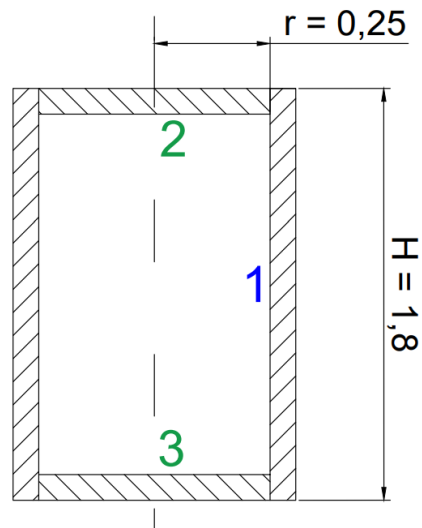
Teoretický výpočet tepelné ztráty tepelně izolovaného vodního zásobníku tepla vychází z výpočtu prostupu tepla válcovou částí (stěny, pláště 1) a prostupu tepla přibližně plochými částmi (víko 2, dno 3, viz obr. 3.1). Součet těchto tepelných ztrát dá dohromady výslednou tepelnou ztrátu zásobníku tepla [12]. Je uvažován uvedený výpočetní model s nastavením dílčích parametrů zásobníku:

teplota okolního vzduchu:

$$T_{amb} = 20 \text{ °C},$$

teplota vody uvnitř zásobníku:

$$T_w = 65 \text{ °C } (\Delta T = 45 \text{ K}),$$



Obrázek 2.10. - Zjednodušené schéma pro výpočet tepelné ztráty zásobníku tepla

2.6.1 Tepelná ztráta pláštěm zásobníku

Tepelná ztráta pláště Φ_l se stanoví podle vztahu

$$\Phi_1 = \frac{T_W - T_{amb}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \right) + \frac{1}{2\pi r_e h_e}} \cdot H \quad (3.1)$$

kde je

λ_i součinitel tepelné vodivosti i -té vrstvy pláště [W/m·K]

n počet vrstev pláště [-],

r_i vnitřní poloměr i -té vrstvy pláště [m],

r_e vnější poloměr zásobníku, včetně izolace [m],

h_e součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu pláště zásobníku [W/m²·K],

H výška zásobníku [m] [12].

Součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu vodního zásobníku tepla je zanedbatelný.

2.6.2 Tepelná ztráta dna a víka zásobníku tepla

Tepelná ztráta dna Φ_2 , resp. víka Φ_3 se stanoví podle vztahu

$$\Phi_2 = \frac{T_W - T_{amb}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{h_e}} \cdot A \quad (3.2)$$

kde je

δ tloušťka i -té vrstvy víka [m],

λ součinitel tepelné vodivosti i -té vrstvy víka [W/m·K],

n počet vrstev víka [-],

h_e součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu víka zásobníku [W/m²·K].

A plocha víka zásobníku [m²] [12].

Součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu vodního zásobníku tepla je opět zanedbatelný.

2.6.3 Vliv tloušťky izolace na tepelnou ztrátu

Všechny stěny zásobníku jsou uvažovány trojvrstvé. Parametry těchto vrstev jsou neměnné, až na tloušťku izolace pláště. Ta se bude měnit od 0 až po 200 mm (viz tab. 3.1).

Jednotlivé vrstvy pláště:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_1 = 0,003 \text{ m}$,
 $\lambda_1 = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace - PUR pěna $\delta_2 = \text{proměnná}$,
 $\lambda_2 = 0,041 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 3) Povrch izolace – PVC $\delta_3 = 0,001 \text{ m}$,
 $\lambda_3 = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Jednotlivé vrstvy víka a dna:

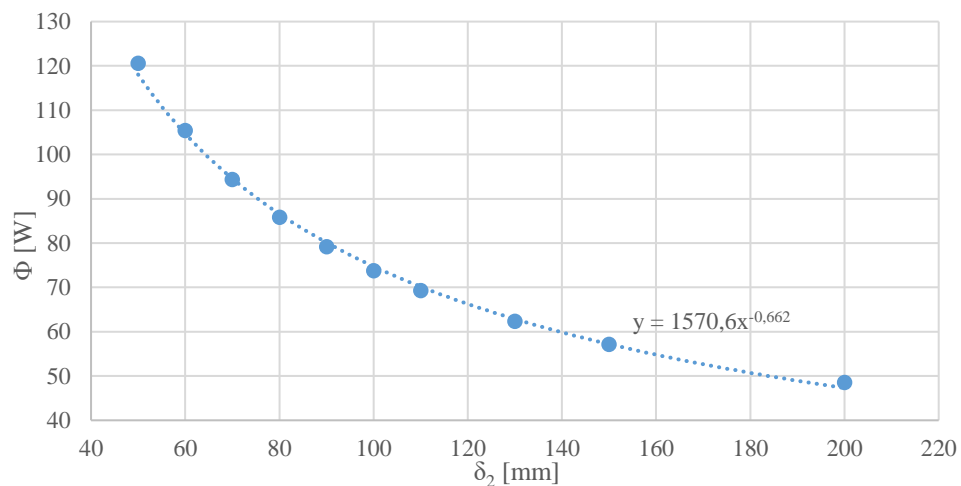
- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_{11} = 0,003 \text{ m}$,
 $\lambda_{11} = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace - PUR pěna $\delta_{22} = 50 \text{ mm}$,
 $\lambda_{22} = 0,041 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 3) Povrch izolace – PVC $\delta_{33} = 0,001 \text{ m}$,
 $\lambda_{33} = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu celého zásobníku je:

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

Tabulka 2.4. - Vliv tloušťky tepelné izolace pláště na tepelnou ztrátu zásobníku tepla

Tloušťka izolace – δ_2 [mm]	Tepelná ztráta – Φ [W]
0	1244
50	121
60	105
70	94
80	86
90	79
100	74
110	69
130	62
150	57
200	49



Obrázek 2.11. - Vliv tloušťky tepelné izolace pláště na tepelnou ztrátu zásobníku

Z tabulky 3.1 a grafu na obrázku 3.2 je zřejmé, že tloušťka tepelné izolace zásobníku má výrazný vliv na tepelnou ztrátu. Lze si všimnout, že rozdíl tepelných ztrát pro různé šířky izolací, hlavně do šířky 100 mm, je významný, například při přechodu mezi 50 mm a 100 mm se tepelná ztráta redukuje téměř o polovinu. V tabulce 3.1 je také zaznamenána hodnota tepelné ztráty pro uvažování případu bez tepelné izolace. V tomto případě nabývá vysoké hodnoty 1244 W. Pokles tepelných ztrát při uvažování šířky tepelné izolace 100 mm a vyšší už není tak razantní. Je nutné zdůraznit, že v tomto modelu je použita tepelná izolace s hodnotou součinitele tepelné izolace $\lambda = 0,041 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Kdyby byla tato hodnota vyšší, křivka tepelných ztrát by byla pozvolnější, vypočtené tepelné ztráty by nabývaly vyšších hodnot.

Šířkou izolace zásobníků teplé vody se zabývá i vyhláška 193/2007 Sb., která stanovuje podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu.

V té se uvádí, že při využití izolačního materiálu se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda \leq 0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, udáváno při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$, je minimální požadovaná tloušťka tepelné izolace pro zásobníky teplé vody 100 mm. V případě odlišných hodnot součinitele tepelné vodivosti se upravuje tloušťka izolace tak, aby byly dosaženy stejné nebo lepší tepelně izolační vlastnosti. Zajímavé je, že součinitel tepelné vodivosti izolačních materiálů se v této vyhlášce udává při $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Běžně se teplota vody uvnitř zásobníků pohybuje kolem $65 \text{ }^\circ\text{C}$, při kterých může λ nabývat odlišných hodnot (viz obr. 2.9). Z tohoto obrázku je zřejmé, že λ některých materiálů s rostoucí teplotou stoupá strměji než u jiných. Při teplotě $65 \text{ }^\circ\text{C}$ mohou být tepelné vlastnosti různých tepelně izolačních materiálů odlišné. Tato vyhláška také stanovuje šířku tepelné izolace pro pasivní zásobníky teplé vody. Pro ty musí tloušťka tepelné izolace nabývat 100 mm při součiniteli tepelné vodivosti $\lambda \leq 0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (při $0 \text{ }^\circ\text{C}$). Pro izolační materiály s odlišnými hodnotami součinitele tepelné vodivosti se upravuje tloušťka izolace tak, aby bylo dosaženo součinitele prostupu tepla $U \leq 0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [26].

2.6.4 Vliv teploty vody na tepelnou ztrátu

Tepelná ztráta zásobníků tepla není ovlivněna pouze tloušťkou tepelné izolace. Významnou roli hraje také teplota vody uvnitř zásobníku tepla. Pro porovnání tepelné ztráty při různé teplotě vody T_w v zásobníku mezi $35 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ je použita stejná geometrie zásobníku z předchozí analýzy, nicméně bude uvažována konstantní tloušťka tepelné izolace stěny $\delta_2 = 100 \text{ mm}$. Je také nutné zmínit závislost součinitele tepelné vodivosti izolace zásobníku tepla na teplotě. Ta se bude měnit takto

$$\lambda = 0,0002 \cdot T_{izol} + 0,0334 \quad (3.3)$$

kde je

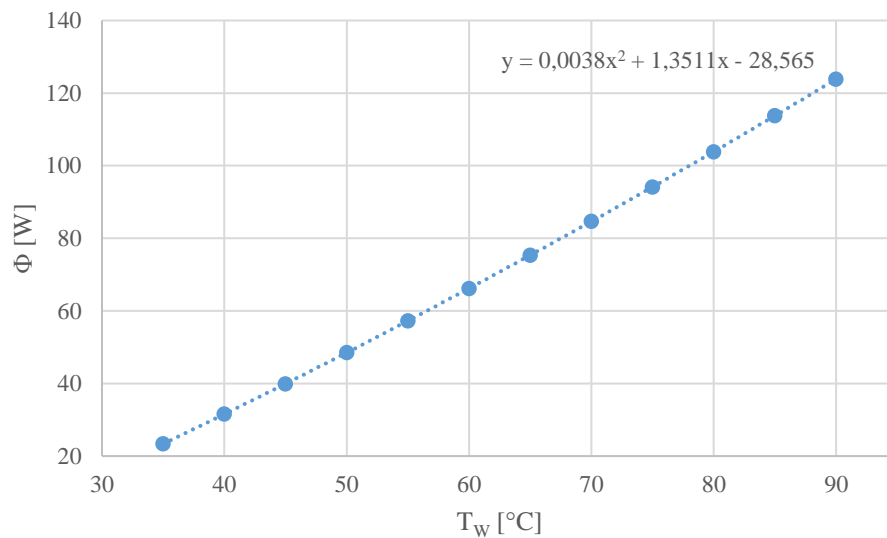
T_{izol} Teplota izolace, získaná aritmetickým průměrem teploty vody a teploty okolního vzduchu [$^\circ\text{C}$].

Hodnoty ostatních vstupních parametrů se oproti minulé kapitole nemění.

Tabulka 2.5. - Vliv teploty vody na tepelnou ztrátu zásobníku

Teplota vody T [°C]	Tepelná ztráta Φ [W]
35	23
40	32
45	40
50	48
55	57
60	66
65	75
70	85
75	94
80	104
85	114
90	124

Z tabulky 3.2 a grafu na obrázku 3.3 je zřejmé, že nárůst tepelné ztráty při stoupající teplotě vody je značný, například rozdíl mezi tepelnou ztrátou zásobníku při teplotě vody 65 °C a 35 °C je téměř trojnásobný. Je patrné, že tepelná ztráta se s měnící teplotou vody uvnitř zásobníku mění exponenciálně. Nárůst mezi tepelnou ztrátou zásobníku při teplotě vody 40 a 45 °C je 8 W, mezi teplotou 85 a 90 °C činí nárůst tepelné ztráty už 10 W. Rovnice průběhu tepelné ztráty na teplotě vody je uvedena v grafu na obrázku 3.3.



Obrázek 2.12. - Vliv teploty vody na tepelnou ztrátu zásobníku

Pro snazší predikci tepelné ztráty se změnou teploty vody lze zavést veličinu: Měrná tepelná ztráta UA [W/K]. Hodnota této veličiny se při rozdílných teplotách výrazně nemění.

$$UA = \frac{\Phi}{\Delta T} = \frac{\Phi}{T_W - T_{amb}} \quad (3.4)$$

kde je

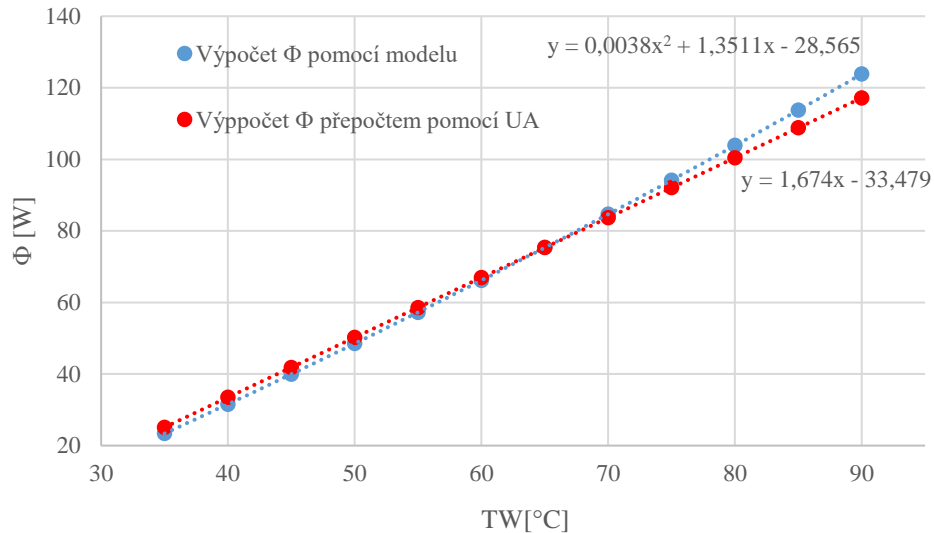
Φ tepelná ztráta zásobníku [W],

ΔT rozdíl teplot mezi teplotou vody a teplotou okolního vzduchu [K],

T_W teplota vody uvnitř zásobníku [°C],

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C] [12] [27].

Výrobci zásobníků tepla uvádějí ve svých podkladech tepelnou ztrátu při $\Delta T = 45$ K (většinou $T_w = 65$ °C; $T_{amb} = 20$ °C). Z těchto hodnot lze jednoduše získat měrnou tepelnou ztrátu použitím vzorce (3.4). Vynásobením měrné tepelné ztráty jiným teplotním rozdílem se dá tepelná ztráta jednoduše predikovat v jiných podmínkách. Rozdíl mezi takto predikovanou tepelnou ztrátou a tepelnou ztrátou vypočtenou pomocí modelu výše je uveden v grafu na obrázku 3.4. Z tohoto grafu je patrné, že rozdíl mezi odlišně stanovenými tepelnými ztrátami je téměř zanedbatelný. Například při $T_w = 80$ °C činí rozdíl pouze 4 W.



Obrázek 2.13 – Porovnání vlivu teploty vody na tepelnou ztrátu zásobníku stanovenou dvěma způsoby

2.7 Stanovení tepelné ztráty dle norem

Stanovení tepelné ztráty zásobníků tepla je důležité pro zjištění energetické účinnosti a hospodárnosti navazujících tepelných soustav. Konkrétně se postupem stanovení tepelné ztráty měřením zabývají tyto normy:

- ČSN EN 12897 - Zásobování vodou – Nepřímo ohřívané uzavřené zásobníkové ohřivače vody.
- ČSN EN 60379 - Metody měření funkce elektrických ohřivačů vody pro domácnost a podobné účely.
- ČSN EN 15332 - Kotle pro ústřední vytápění – Stanovení energetické náročnosti zásobníků na teplou vodu.
- ČSN EN 12977-3 – Tepelné solární soustavy a součásti - Soustavy stavěné na zakázku - Část 3: Metody zkoušení parametrů solárních zásobníků pro ohřev vody.

Značení veličin je v jednotlivých kapitolách zachováno podle uvádění v normách.

2.7.1 ČSN EN 12897

Příprava

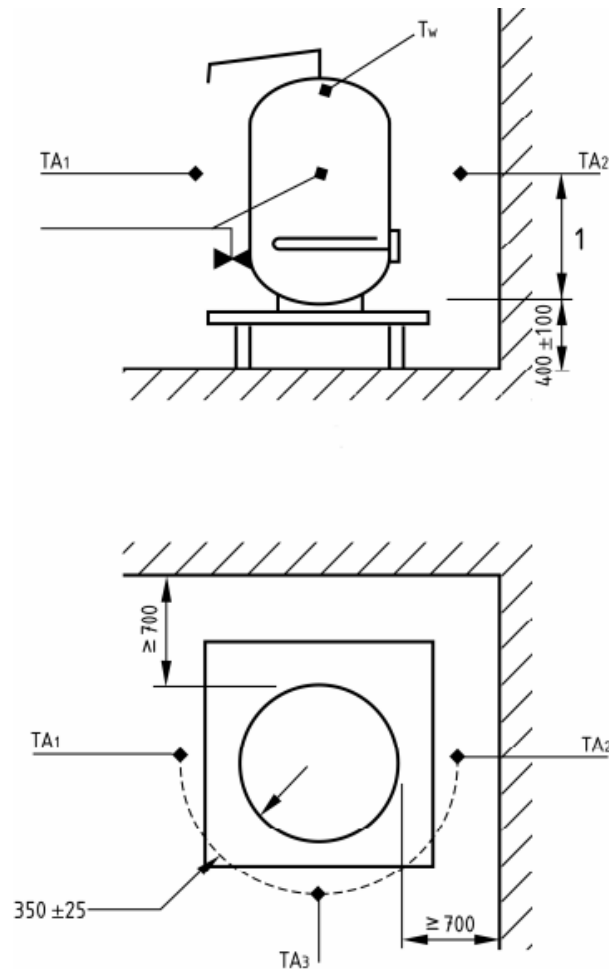
Zásobníky tepla musí být v této zkoušce vybaveny horizontálně namontovanou topného tělesa. Výkon topného tělesa činí 3 kW pro zásobníkové ohřivače až do objemu 250 l. Pro tepelné zásobníky o větších objemech může být použit větší výkon. Napájení topného tělesa musí být připojeno přes elektroměr, měřící s přesností $\pm 0,01$ kWh. Topné těleso musí být umístěno tak, že 85 % objemu zásobníku tepla je nad jeho polohou.

Pro účely zkoušení musí být zařízení upevněno na plochu podložku z dřevovláknité desky o tloušťce alespoň 20 mm, která se nachází ve výšce 400 ± 100 mm nad podlahou. Alternativně lze zařízení upevnit na zeď podle pokynů výrobce. Pokud není zařízení připevněno ke zdi, musí být podle obr. 3.5 vzdáleno od okolních stěn alespoň o 700 mm.

Zkušební zařízení nesmí být vystaveno přímému slunečnímu záření. Teplota okolního vzduchu se musí pohybovat v rozmezí $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ K}$. Tu je nutné měřit třemi termočládky či jinými čidly teploty (TA_1 , TA_2 , TA_3) (viz obr. 3.5). Čidla teploty musí být umístěna v polovině výšky zásobníku s nepřesností ± 25 mm a musí být vzdálena 350 ± 25 mm od vnější strany obalu zkoušeného zařízení.

Na povrchu nebo uvnitř zásobníku tepla, cca 25 mm pod výstupem teplé vody, je nutné měřit teplotu vody viz čidlo T_w na obr. 3.5. Ta se musí měřit termočládkem nebo jiným teplotním čidlem. Všechny čtyři senzory (TA_1 , TA_2 , TA_3 a T_w) musí být připojeny k zařízení pro záznam dat, které je schopné zaznamenávat jednotlivé teploty v intervalu nepřesahujícím 5 minut. Přesnost všech snímačů teploty musí být $\pm 1 \text{ K}$.

Poté, co je vše správně připraveno, se musí zásobník tepla napustit studenou vodou. Toho se docílí dočasným připojením na uzavírací ventil na vstupu vody do zásobníku tepla nebo jiným vhodným způsobem. To, že je zásobník tepla naplněn, poznáme tak, že začne vytékat voda odvzdušňovací trubicí, která je umístěna v horní části zásobníku tepla. Poté se spustí topné těleso, které je nastaveno tak, aby ohřálo teplotu vody v zásobníku na $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Z důvodu teplotní roztažnosti vody je nutné počítat s tím, že při ohřevu bude ze zkušebního zařízení voda kapat. Je tedy vhodné připojit do systému expanzní nádobu.



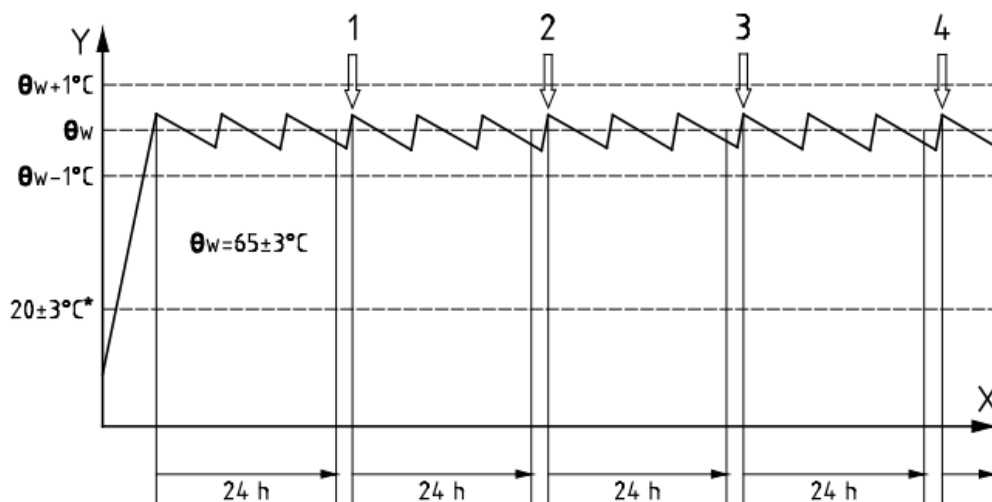
Obrázek 2.14. - Schéma měřeného zařízení [28]

Postup měření

Poté co se voda v zásobníku tepla zahřeje na požadovanou teplotu, je nutné nastavit topné těleso, aby udržovalo teplotu v zásobníku na hodnotě $65\text{ °C} \pm 3\text{ K}$.

Po maximálně 24hodinové stabilizační periodě se zapíše počáteční stav elektroměru s přesností na 0,01 kWh. Poté se vždy po 24hodinových intervalech zapisují hodnoty spotřeby energie. Pro každý interval se také zapíše střední hodnota teploty okolního vzduchu T_{amb} a teploty vody T_w uvnitř zkušebního zařízení. Zkoušení pokračuje do té doby, dokud se rozdíl mezi získanou tepelnou ztrátou podle vzorce (3.5) neliší o méně než 2 % po dvou po sobě následujících 24hodinových intervalech. Trvalá tepelná ztráta se poté stanoví jako jejich střední hodnota.

Pokud není možné získat výsledky lišící se navzájem o méně než 2 %, prodlouží se zkouška na dobu 168 hodin tedy 7 dní. Pro výpočet tepelné ztráty se poté použijí hodnoty získané v posledních třech 24hodinových periodách.



Obrázek 2.15. - Teplotní režim (první tři cykly) [28]

kde je

X čas [hod],

Y teplota [°C],

1, 2, 3, 4 časy odečtů z elektroměru.

Výpočet výsledku

Ztráta zásobníku teplé vody za 24 hodin v kWh se vypočte podle vztahu

$$Q_{24} = E_{24} \left(\frac{45}{T_w - T_{amb}} \right) \quad (3.5)$$

kde je

E energie spotřebovaná za 24 hodin [kWh],

T_w střední teplota vody v zásobníku v průběhu 24hodinové zkušební periody,

T_{amb} střední teplota okolního vzduchu v průběhu 24hodinové zkušební periody [°C] [28].

2.7.2 ČSN EN 60379

Příprava

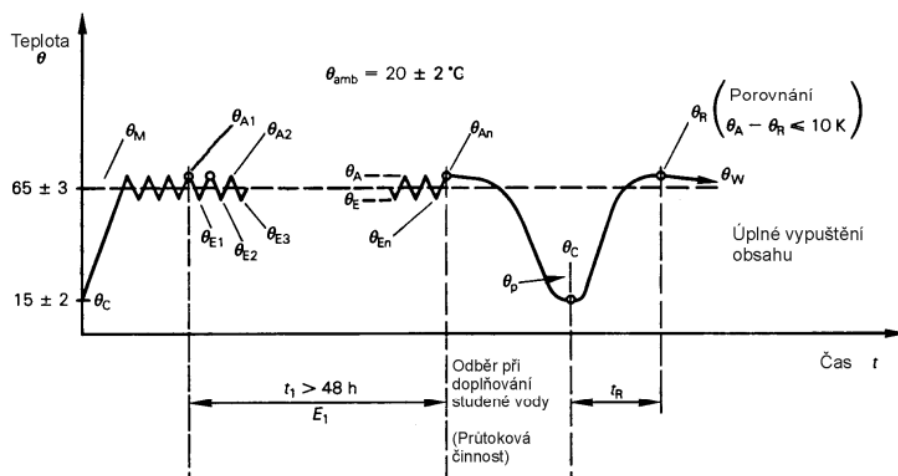
V této normě je celé měření velmi podobné jako u normy ČSN 12897. Nejdříve se zásobník tepla napustí studenou vodou. Poté se zapne topné těleso na několik cyklů činnosti termostatu, dokud se nedosáhne ustálených podmínek vody v zásobníku tepla ($T_w = 65 \text{ °C} \pm 3 \text{ K}$). Umístění topného tělesa není v normě specifikováno. Tato norma přehledně předepisuje maximální nepřesnosti přístrojů měřících dané veličiny (viz tab. 3.3).

Tabulka 2.6. Popis přesnosti přístrojů v normě ČSN EN 60379 [29]

Měřené veličiny	Přesnost měřícího přístroje
Teplota okolního vzduchu	přesnost $\pm 1 \text{ K}$
Teplota vody	nejméně $0,2 \text{ K}$ a přesnost $\pm 1 \text{ K}$
Elektrický příkon	maximální nepřesnost 10 W v nulovém bodě a maximální nepřesnost 2% při největší jmenovité teplotě
Čas	přesnost $\pm 1 \%$.

Postup měření

Samotná zkouška probíhá takto. Během doby trvající nejvýše 48 hodin se odečte spotřebovaná energie v kWh. Při každém sepnutí a rozepnutí termostatu se zaznamenají teploty vody T_{Ei} a T_{Ai} .



Obrázek 2.16. - Znárodnění teplot použitých ve vzorcích (3.6) - (3.8) [29]

Obrázek 3.7 zobrazuje ve své levé části průběhy teplot v době zkoušky. Přehledně znázorňuje teploty použité v níže uvedených vzorcích.

Výpočet výsledku

Spotřeba energie E za 24 hodin se vypočítá podle následujícího vzorce

$$E_{24} = \frac{E_{zk} \cdot 24}{\frac{t_{zk}}{3600}} \quad (3.6)$$

kde je

E_{zk} spotřebovaná energie topného tělesa v době zkoušky [kWh],

t_{zk} doba trvání zkoušky [s], kratší než 48 h.

Průměrná teplota vody T_M se vypočítá ze vzorce

$$T_M = \frac{1}{t_{zk}} \sum_i \frac{T_{Ai} + T_{Ei}}{2} (t_{Ai} - t_{Ei}) \quad (3.7)$$

kde je

t_{zk} doba periody pro zkoušky [s],

t_{Ai} doba vypnutí termostatu [s],

t_{Ei} doba sepnutí termostatu [s],

T_{Ai} teplota vypnutí termostatu [°C],

T_{Ei} teplota sepnutí termostatu [°C].

Statická ztráta za 24 hodin Q_{TZ} [kWh], vztažená na rozdíl teplot 45 K se stanoví podle následujícího vzorce

$$Q_{24} = \frac{45}{T_M - T_{amb}} \cdot E_{24} + \frac{1,16 \cdot V \cdot (T_{A1} - T_{An})}{1000} \quad (3.8)$$

kde je

T_M průměrná teplota vody [°C],

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C],

E spotřeba energie E za 24 hodin [kWh],

V skutečný objem zásobníku teplé vody [m³],

T_{A1} teplota vypnutí termostatu na počátku zkoušky [°C],

T_{An} teplota vypnutí termostatu na konci zkoušky [°C].

Hodnota Q_{TZ} se musí uvést na dvě desetinná místa pro hodnoty pod 1 kWh za 24 hodin a na jedno desetinné místo pro hodnoty rovné nebo přesahující 1 kWh za 24 hodin [29].

Výpočet tepelné ztráty podle normy ČSN EN 60379 je podobný jako u normy ČSN 12897. Liší se rozšířením vzorce (3.5) o další člen. Jedná se o zlomek, který zahrnuje skutečný objem tepelného zásobníku a rozdíl teplot vypnutí termostatu na počátku a na konci zkoušky.

2.7.3 ČSN EN 15332

Příprava

Proces měření je podobný jako u norem zmíněných výše. Teplota vody v zásobníku tepla se udržuje na konstantní teplotě pomocí elektrického ohřevu. Konkrétně se jedná o topné těleso, které musí být ponořeno v dolní třetině zásobníku. Během testu musí být zásobník teplé vody oddělen od jakéhokoli externího připojení. Ve vzdálenosti 700 mm kolem zásobníku tepla a 100 mm nad zásobníkem by nemělo být nic umístěného.

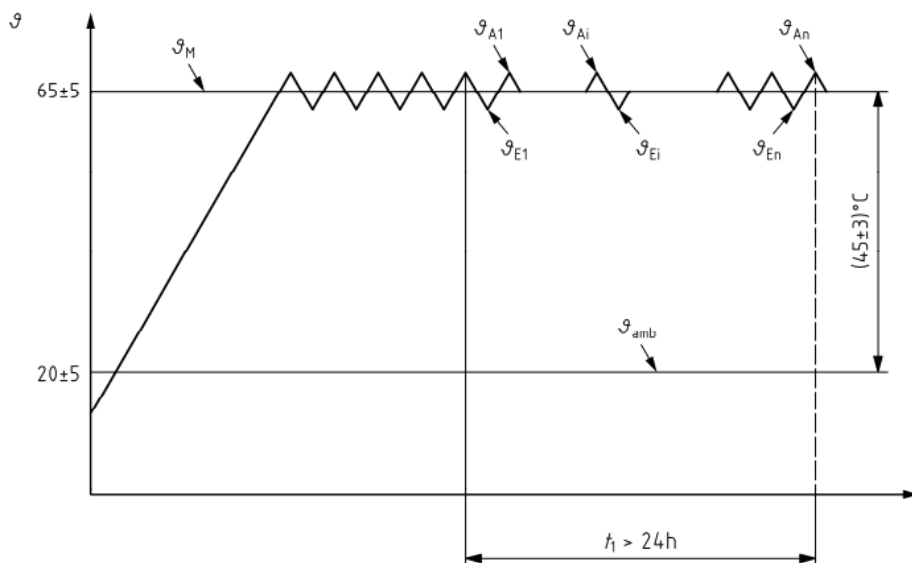
Teplota okolního vzduchu by se měla měřit v polovině výšky zásobníku a nejméně 1000 mm od jeho stěny. Pokud je mezera mezi okolní zdí a zásobníkem tepla menší než 2000 mm, umístěje se čidlo měřící teplotu do středu vzdálenosti. Okolní teplota by se měla udržovat na $T_{amb} = 20 \text{ °C} \pm 5 \text{ K}$, a nesmí kolísat více než $\pm 1 \text{ K}$.

Měření teploty vody se provádí v horní třetině zásobníku nebo v místě, které je určené výrobcem. Teplota uvnitř musí mít minimálně 65 °C . Měla by se udržovat v rozmezí $\pm 5 \text{ K}$. Spínací diference elektrického ohřevu musí být menší než $0,8 \text{ K}$.

Rozdíl mezi teplotou vody uvnitř zásobníku tepla a teplotou okolního vzduchu musí být nejméně $\Delta T = 45 \text{ K}$.

Postup měření

Test trvá minimálně 24 hodin. Před začátkem testování musí být ustálená teplota vody uvnitř zásobníku tepla. Test začíná a končí vypnutím topného tělesa uvnitř zásobníku tepla (viz obr. 3.8).



Obrázek 2.17. - Průběh teplot v průběhu testu [30]

Stanovení výsledku

Spotřeba energie E [kWh] za 24 hodin se vypočítá podle vzorce

$$E_{24} = \frac{E_{zk} \cdot 24}{\frac{t_{zk}}{3600}} \quad (3.9)$$

kde je

E_{zk} spotřebovaná energie za dobu t_1 [kWh],

t_{zk} doba měření (zkoušky) [s].

Průměrná teplota vody uvnitř tepelného zásobníku se vypočte podle vzorce

$$T_M = \frac{T_{MA} + T_{ME}}{2} \quad (3.10)$$

kde je

T_{MA} průměrná spodní hranice udržované teploty v zásobníku [°C],

T_{ME} průměrná horní hranice udržované teploty v zásobníku [°C].

$$T_{MA} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ai}}{n_n}; \quad T_{ME} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ei}}{n_n} \quad (3.11)$$

kde je

T_{ai} spodní hranice udržované teploty v zásobníku [°C],

T_{ei} horní hranice udržované teploty v zásobníku [°C],

n_n počet změřených hodnot.

Tepelná ztráta za 24 hodin v kWh se vypočte podle rovnice

$$Q_{24} = \frac{\min(45 \text{ K}; \Delta T)}{T_M - T_{amb}} \cdot E_{24} \quad (3.12)$$

Kde je

ΔT rozdíl mezi teplotou vody uvnitř zásobníku a okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],

T_{amb} teplota okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],

T_M teplota vody uvnitř tepelného zásobníku [$^{\circ}\text{C}$],

E_{24} spotřeba energie E za 24 hodin [kWh] [30].

Výpočet tepelné ztráty dle normy ČSN EN 15332 je velmi podobný s výše uvedenými normami. Rozdíl nastává v různých požadavcích na teplotu okolního vzduchu a teplotu vody uvnitř zásobníku tepla. Délka měření je také rozdílná, oproti výše uvedených normách.

2.7.4 ČSN EN 12977

Příprava

Příprava je oproti ostatním normám jiná zásobník tepla není celý izolovaný jako v předchozích normách. Je napojený na 2 nebo 4 přípojné trubky, pomocí kterých bude voda v zásobníku tepla ohřívána. Počet trubek musí být později uveden ve výsledném shrnutí zkoušky. Každý zásobník tepla musí být vybaven pomocným topným tělesem. Umístění topného tělesa i jeho příkon není v normě uveden. Nepřesnost elektroměru musí být do 2 %. Ostatní vývody musí být pečlivě zaizolované, jako v předchozích normách. V normě není popsáno podrobné umístění zásobníku tepla v místnosti. Jediná informace, která je o prostředí zkoušky uvedena je, že zásobník tepla musí být umístěn v klimatizované místnosti, ve které bude udržována teplota vzduchu $T_{amb} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ K}$. Tato teplota bude měřena čidlem s nejistotou 0,1 K. Další čidla teploty budou umístěna u vstupů a výstupů zásobníku tepla, budou mít také nejistotu 0,1 K.

Postup měření

Postup měření probíhá v různých fázích. Nejprve se zásobník tepla nabíjí na ustálenou teplotu vody, která by měla dosáhnout teploty 55 až 60 °C. Poté následuje fáze stání. Při té teplota vody v zásobníku tepla klesá. Trvá typicky 48 hodin, její doba se však může lišit. Měla by být dlouhá tak, aby se při jejím trvání ztratilo 40 až 60 % uložené tepelné energie.

Stanovení výsledku

Průběh teploty vody uvnitř zásobníku tepla při fázi stání popisuje vzorec

$$T(t) = T_{amb} + (T_{w0} - T_{amb}) \cdot e^{-\frac{UA}{C} \cdot t_{CH} \cdot 60} \quad (3.13)$$

kde je

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C],

T_{w0} původní teplota vody v zásobníku tepla [°C],

t_{CH} doba chladnutí zásobníku tepla [s],

UA měrná tepelná ztráta [W/K],

C tepelná kapacita [kJ/K] [31].

Tepelná kapacita C se získá pomocí

$$C = 4,149 \cdot V \quad (3.14)$$

kde je

V objem zásobníku tepla [l].

Hlavním cílem této zkoušky je stanovení měrné tepelné ztráty zásobníku tepla UA [W/K]. Její hodnota se získá pomocí dosazení vzorce (3.14) do vzorce (3.13). po úpravách rovnice lze UA vyjádřit

$$UA = -\ln\left(\frac{T(t) - T_{amb}}{(T_{w0} - T_{amb}) \cdot t \cdot 60}\right) \cdot 4,149 \cdot V \quad (3.15)$$

2.7.5 Porovnání ČSN EN 12897, ČSN EN 60379, ČSN EN 15332 a ČSN EN 12977

Podle výše uvedených norem ČSN EN 12897, ČSN EN 60379 A ČSN 15332 se tepelná ztráta zásobníku tepla [kWh/24 hodin] určí velmi podobně. Měření se provádí při ustálených provozních podmínkách, kdy je voda v nádrži udržována na konstantní teplotě po dobu určitého intervalu pomocí topného tělesa. Díky odečtu spotřebované energie topného tělesa lze vypočítat tepelnou ztrátu zásobníku teplé vody. Odlišný postup je stanoven v normě ČSN EN 12977. Zde se stanovuje měrná tepelná ztráta [W/K]. Ta se zjišťuje při fázi stání zásobníku tepla. V této fázi se zkoumá úbytek tepelné energie, ze které se poté pomocí matematických modelů stanoví měrná tepelná ztráta.

V následující tabulce 3.4 jsou přehledně porovnány rozdíly mezi jednotlivými normami. Je zřejmé, že normy ČSN EN 12897, ČSN EN 60379 A ČSN 15332 udržují při zkoušce teplotu vody uvnitř zásobníku tepla kolem hodnoty 65 °C. Při postupu dle ČSN EN 12977 se voda v zásobníku tepla nejprve ohřeje na teplotu 55 až 60 °C. Poté voda v zásobníku chladne. Také je zřejmé, že hodnota teploty okolního vzduchu by se podle všech výše zmíněných norem měla pohybovat kolem hodnoty 20 °C. Doba měřicího cyklu je v normách odlišná. Vždy je však interval dlouhý alespoň 24 hodin. Umístění topného tělesa je uvedeno v normě ČSN EN 12897, kde se stanoví, že by mělo být 85 % objemu zásobníku nad topným tělesem, a v normě ČSN 15332, zde by měla být topné těleso umístěno v dolní třetině zásobníku tepla. Ostatní normy umístění topného tělesa neuvádí.

Tabulka 2.7. - Porovnání měření tepelné ztráty dle norem ČSN EN 12897, ČSN EN 60379, ČSN EN 15332 a ČSN EN 12977 [28]-[31]

Norma	T_{amb} [°C]	T_w [°C]	Doba měření [h]	Umístění topného tělesa	Výsledek
ČSN EN 12897	20 ± 3	65 ± 3	24	85 % objemu zásobníku musí být nad ním	tepelná ztráta [kWh/24 h]
ČSN EN 60379	20 ± 2	65 ± 3	<48 start a konec vypnutí topného tělesa	není uvedeno	tepelná ztráta [kWh/24 h]
ČSN EN 15332	20 ± 5	65 ± 5	>24 start a konec vypnutí topného tělesa	dolní třetina zásobníku	tepelná ztráta [kWh/24 h]
ČSN EN 12977	20 ± 2	55 - 60	typicky 48 ztráta uložené energie 40 až 60 %	není uvedeno	měrná tepelná ztráta [W/K]

3. Dodatkové tepelné ztráty

V kapitole 3, která se věnuje stanovení tepelné ztráty zásobníku se uvažuje zásobník dokonale zaizolován. Odpojí se od všech přívodních a odvodních potrubí, vývody od potrubí se z pravidla zazátkují a pokryjí se doplňkovou tepelnou izolací, aby nedocházelo k dodatkovým tepelným ztrátám. Tepelná ztráta takto upraveného zásobníku tepla se poté uvádí na energetických štítcích. Při běžném užívání takto odpojený zásobník tepla není. Je přes ventily napojen na potrubí. Právě ventily, které většinou nejsou opatřeny tepelnou izolací, jsou místy, kde vznikají tepelné mosty. Těmi zpravidla teplo uniká s větší intenzitou než z pláště zásobníku. V připojeném potrubí pak může vznikat nežádoucí recirkulace vody v potrubí. Vzniká v klidovém stavu, kdy potrubím neproudí nuceně voda. Voda v připojeném potrubí vychladne rychleji oproti vodě v tepelném zásobníku, který je udržován na požadované teplotě zdrojem tepla. S rozdílem teplot mezi teplou a studenou vodou vzniká rozdíl hustot. S tím je spojena přirozené proudění, která způsobuje recirkulaci vody mezi potrubím a zásobníkem tepla, což je spojeno s nárůstem tepelné ztráty [27][32]. Tepelná ztráta zásobníků tepla se s dodatkovými tepelnými ztrátami může až násobně zvyšovat oproti hodnotám uvedeným na energetickém štítku.

3.1 Tepelné mosty

Tepelné mosty jsou mohou být pro tepelné ztráty zásobníků tepla klíčové. Tepelný most je obecně místo v obálce zkoumaného objektu, kde teplo uniká ven s větší intenzitou než v jeho okolí. Tepelné mosty tedy způsobují ztrátu tepla navíc a s tím i spojenou zvýšenou spotřebu energie. Tepelné mosty mohou být způsobeny například špatným návrhem, nekvalitní izolací nebo nevyhovující konstrukcí zásobníku. Tepelné mosty u vodních zásobníků tepla jsou především v místech, která běžně nejsou pokrytá tepelnou izolací [33]. Výpočtem tepelné ztráty a tepelných mostů ventilů se zabývá norma ČSN EN ISO 12241 [34]

3.1.1 Výpočet podle ČSN EN ISO 12241

Tato norma se v jedné své kapitole věnuje stanovením tepelných mostů neizolovaných ventilů připojených pomocí příruby či pomocí svaru. Tepelná ztráta tepelných mostů ventilů Φ_{TM} [W] se počítá pomocí vzorce

$$\Phi_{TM} = K \cdot (T_W - T_{amb}) \quad (4.1)$$

kde je

K koeficient tepelného mostu [W/K],

T_W teplota vody uvnitř ventilu [°C],

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C] [34].

V normě ISO 12241 je uvedena tabulka konkrétních druhů ventilů. Pro každý z nich se vypočte koeficient tepelného mostu odlišně. Jsou zde však i obecné postupy výpočtu tepelné ztráty tepelných mostů pro ventily, připojené pomocí příruby, či pomocí svaru, které zde nejsou uvedeny. Obecný postup pro výpočet tepelného mostu ventilů spojených pomocí svaru je následující:

$$K = f \cdot h_e \cdot A_V \quad (4.2)$$

kde je

f korekční faktor [-],

h_e koeficient externího přenosu tepla [W/m²·K],

A_V vnější plocha ventilu [m²], musí být uvedena výrobcem nebo musí být spočítána [34].

Korekční faktor f se vypočte podle vzorce

$$f = -\frac{0,21}{1000} \cdot T_w + 0,638 \quad (4.3)$$

kde je

T_w teplota vody uvnitř ventilu [°C] [34].

Koeficient externího přenosu tepla se vypočte podle vzorce

$$h_e = 1,56 \cdot \sqrt[3]{|T_w - T_{amb}|} + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[\frac{T_w + T_{amb}}{2} + 273,15 \right]^3 \quad (4.4)$$

kde je

T_w teplota vody uvnitř ventilu [°C],

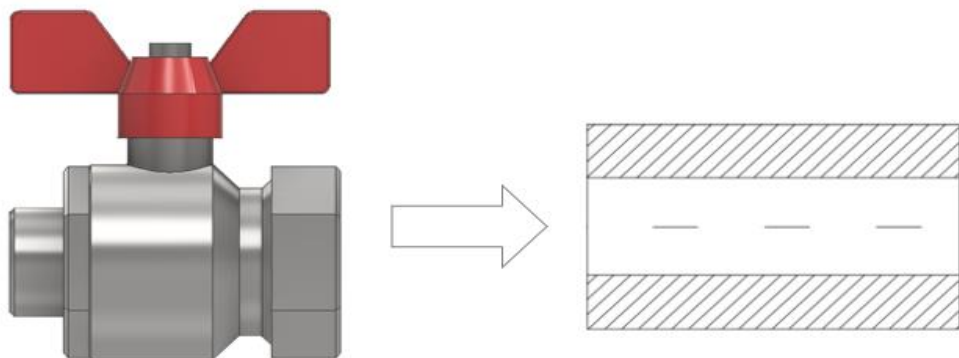
T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C],

ε emisivita povrchu ventilu [-],

σ Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$) [W/m²·K⁴] [34].

3.1.2 Stanovení tepelné ztráty ventilu

Teoretický výpočet tepelné ztráty ventilu, který propojuje zásobník s potrubím, lze přirovnat k výpočtu tepelné ztráty neizolované trubky (viz obr. 4.1). Rozměry této trubky budou aproximovány tak, aby se co nejvíce přibližovaly ke středním hodnotám rozměrů jednotlivých částí ventilu. Pro stanovení tepelné ztráty se zvlášť vypočte hodnota tepelné ztráty neizolované trubky Φ_{kl} . Tato hodnota se sečte s tepelnou ztrátou tepelného mostu ventilu Φ_{TM} , která se získá podle vzorců (4.1) - (4.4) z normy ČSN EN ISO 12241.



Obrázek .3.1. - Schéma zjednodušení ventilu

Tepelné ztráty neizolované trubky Φ_{k1} [W] se stanoví podle vztahu

$$\Phi_{k1} = \frac{T_W - T_{amb}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_1}\right) + \frac{1}{2\pi r_e h_e}} \quad (4.5)$$

kde je

T_W teplota vody uvnitř ventilu [°C],

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C],

λ součinitel tepelné vodivosti trubky/ventilu [W/m·K],

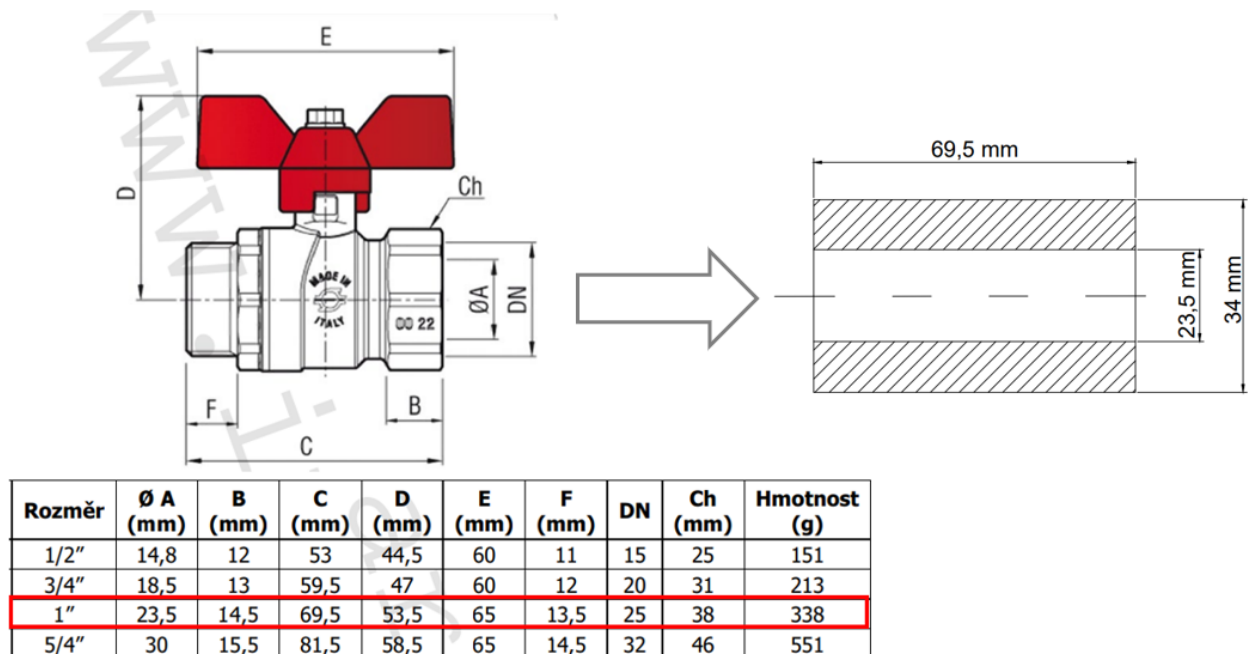
r_e vnější poloměr neizolované trubky [m],

r_1 vnitřní poloměr neizolované trubky [m],

h_e součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu neizolované trubky [W/m²·K] [12].

3.1.3 Vliv teploty na tepelnou ztrátu ventilu

Je uvažován kulový uzávěr vody – perfecta, velikosti „1“. Ventil je zkonstruován z materiálu niklované mosazi. Nejprve se provede aproximace rozměrů modelu trubky (viz obr. 4.2).



Obrázek 3.2. - Schéma zjednodušení ventilu [35]

Rozměry modelu lze odečíst z obrázku 4.2 vpravo. Další vlastnosti modelu jsou:

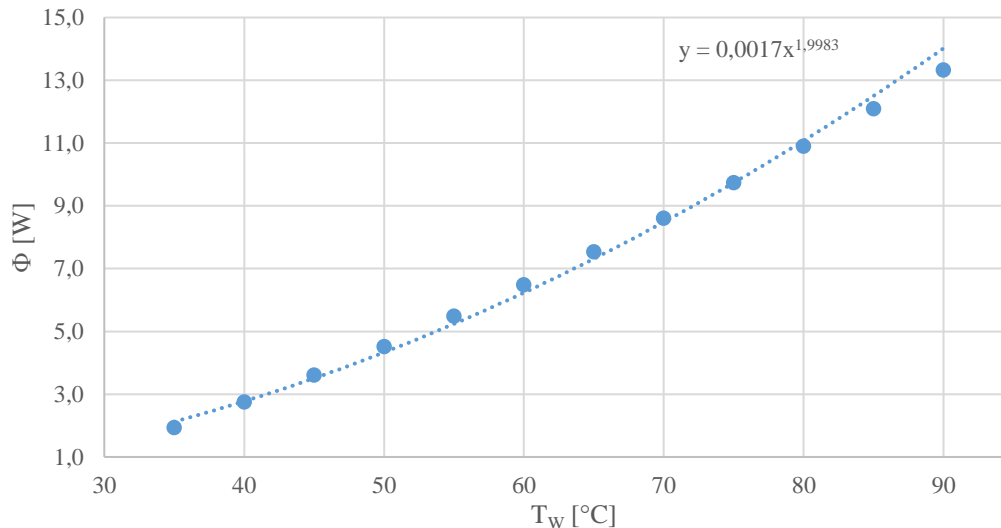
Emisivita niklované mosazi:	$\varepsilon = 0,6,$
součinitel tepelné vodivosti niklované mosazi:	$\lambda = 51 \text{ W/m}\cdot\text{K},$
Stefan-Boltzmannova konstanta:	$\sigma = 5,67\cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4,$
teplota okolního vzduchu	$T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$
Teplota vody uvnitř ventilu	$T_w = \text{proměnná}.$

Ke stanovení tepelné ztráty tepelným mostem ventilu je třeba znát vnější plochu ventilu viz vzorec (4.2). Tu jsem získal pomocí aplikaci Autodesk Inventor, ve které jsem ventil vymodeloval. Povrch vymodelovaného ventilu: $A_V = 0,0154 \text{ m}^2.$

Podle vzorců (4.1) – (4.5) lze z těchto vstupních parametrů stanovit tepelnou ztrátu kohoutu.

Tabulka 3.1. - Vliv teploty vody na tepelnou ztrátu ventilu

Teplota vody T_w [$^\circ\text{C}$]	Tepelná ztráta Φ [W]
35	1,9
40	2,8
45	3,6
50	4,5
55	5,5
60	6,5
65	7,5
70	8,6
75	9,7
80	10,9
85	12,1
90	13,3

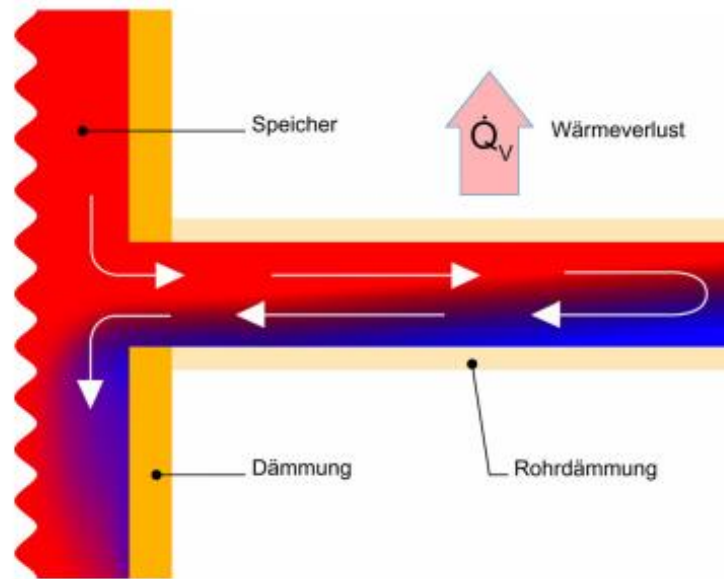


Obrázek 3.3. - Vliv teploty vody na tepelnou ztrátu ventilu

Z tabulky 4.1 a grafu na obrázku 4.3 je patrné, že tepelná ztráta stoupá při vyšších teplotách vody uvnitř ventilu. Také je zjevné, že tepelná ztráta ventilu při zvyšujících se teplotách neroste lineárně jako tepelná ztráta zásobníků v kapitole 3.1.4, ale exponenciálně. Rovnice nárůstu tepelné ztráty s teplotou vody je uvedena v grafu na obrázku 4.3. Exponenciální růst tepelné ztráty ventilů se zvyšující se teplotou se promítne ještě výrazněji, při vyšším počtu ventilů připojených k zásobníku tepla.

3.2 Tepelné ztráty vnitřní recirkulací v potrubí

Vnitřní recirkulace vody v potrubí je jev, který se projevuje v připojovacích potrubích zásobníků tepla a silně ovlivňuje tepelnou ztrátu samotných zásobníků tepla. Vzniká v klidovém stavu bez nuceného proudění vody v potrubí, kdy voda v připojeném potrubí rychle vychladne oproti vodě v zásobníku tepla. To se děje zejména kvůli vysokému poměru ochlazovaného povrchu trubky ku objemu vody uvnitř trubky. S teplotním rozdílem mezi teplou vodou v zásobníku a vychladlou vodou v potrubí vzniká rozdíl hustot. V důsledku rozdílu hustot vznikne přirozené proudění v rámci trubky. Studená voda se spodní vrstvou v potrubí dostává do zásobníku, zatímco teplá voda ze zásobníku proudí do potrubí. Schéma vnitřní recirkulace v potrubí přehledně zobrazuje obrázek 4.4 [32][36].



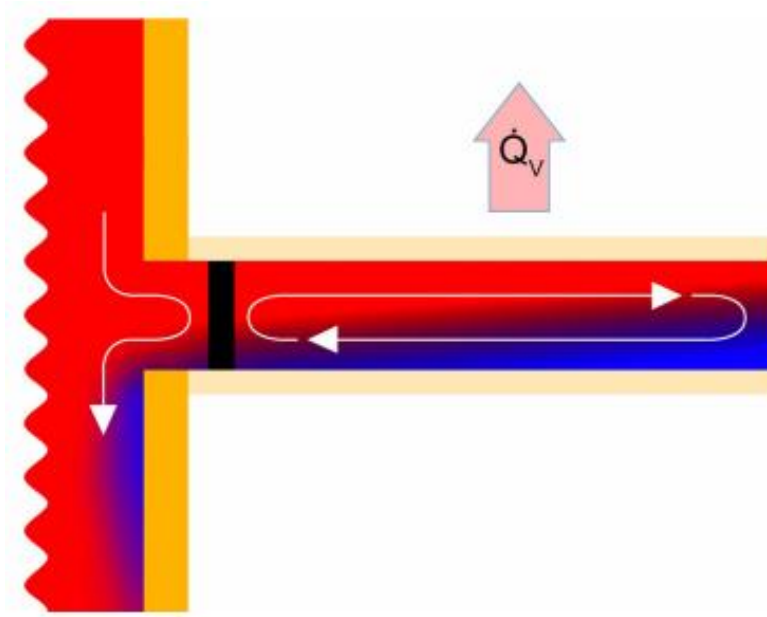
Obrázek 3.4. - Ukázka vnitřní recirkulace v potrubí [36]

3.2.1 Tepelné pasti

Tepelné past je malé zařízení nebo technické řešení, které pomáhá minimalizovat vnitřní recirkulaci v potrubí a redukuje dodatkovou tepelnou ztrátu zásobníků tepla, se kterou je spojena spotřeba energie.

Zpětný ventil

Zpětný ventil je velmi jednoduchý typ tepelné pasti. Tento ventil zajišťuje průtok vody pouze jedním směrem, respektive nepřipustí průtok směrem opačným. Ventil svým zavřením při klidovém stavu oddělí teplou vodu v zásobníku tepla od chladnoucí vody v připojeném potrubí a zabrání tím recirkulaci v potrubí (viz obr. 4.5). Zamezí tím proudění studené vody z vychlazených trubek do zásobníku tepla. Výhodou tohoto druhu tepelné pasti je nízká náročnost montáže [32][36].

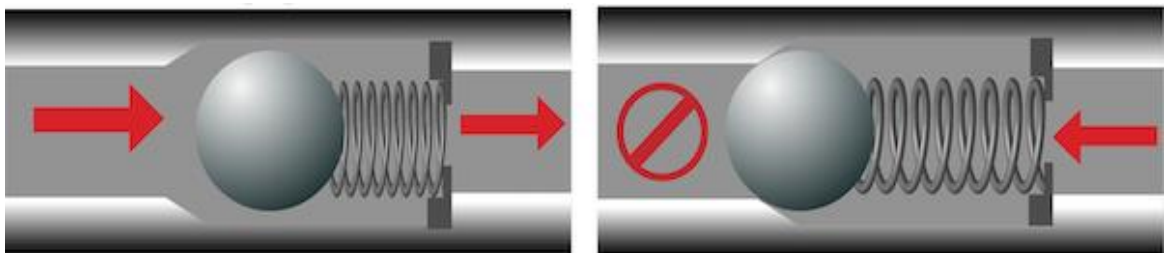


Obrázek 3.5. Schéma zabránění jevu recirkulace potrubím pomocí kulového kohoutu [36]

Existuje několik typů zpětných ventilů:

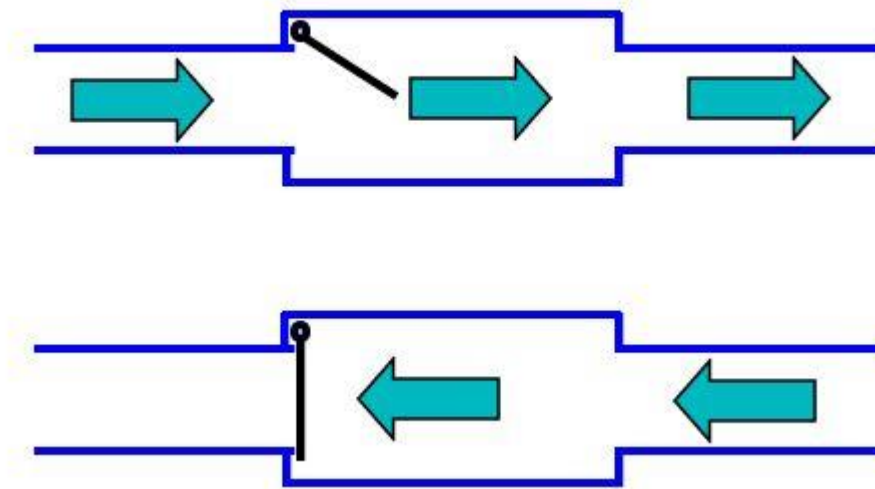
- Kulový zpětný ventil
- Klapkový zpětný ventil

Kulový zpětný ventil je zařízení, které se skládá z úzkého hrdla, pohyblivé kuličky a pružiny. Kulička deformuje pružinu, když tekutina prochází správným směrem a uvolní tím úzké hrdlo ventilu. Umožní tím průtok teplé vody ze zásobníku tepla. Naopak voda proudící opačným směrem pružinu nestlačí a kulička ucpe úzké hrdlo ventilu. Obrázek 4.6 přehledně ukazuje oba stavy kulového zpětného ventilu. Vlevo je ventil otevřen a vpravo zavřen [37].



Obrázek 3.6. - Schéma kulového zpětného ventilu [37]

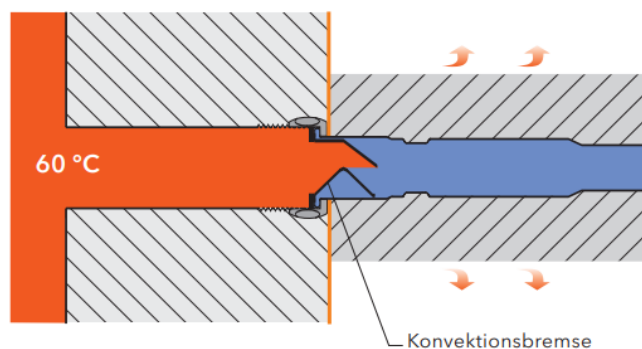
Klapkový zpětný ventil se skládá z klapky, kterou je možné otevřít pouze v jednom směru. V některých případech se tento typ ventilu může skládat i z přidavné pružiny, která pomáhá udržovat klapku v uzavřeném stavu. Když voda proudí v žádoucím směru klapka se jednoduše otevře. Když však voda proudí v opačném směru klapka zůstane zavřená (viz obr. 4.7) [38].



Obrázek 3.7. - Schéma klapkového zpětného ventilu [38]

Konvekční brzda

Konvekční brzda je zařízení, které se vkládá mezi připojené potrubí a vývod ze zásobníku tepla. Tato tepelná past zajišťuje zamezení vnitřní recirkulace v potrubí, a to pomocí nakloněných plošin umístěných uvnitř konvekční brzdy (viz obr. 4.8). Ty zabrání studené vodě z připojených trubek se vrstvit pod teplou vodu v zásobníku tepla. Výhodou této tepelné pasti je nízká náročnost montáže [39].

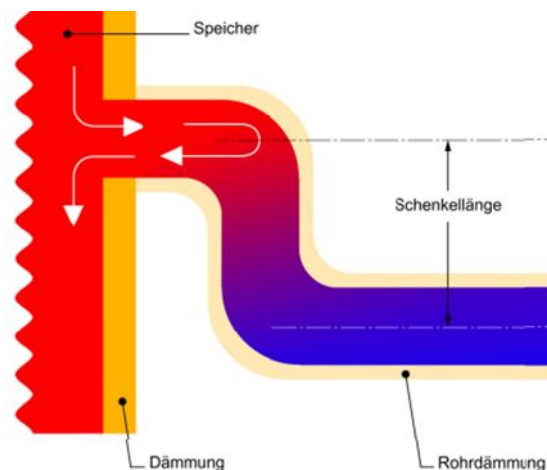


Obrázek 3.8. - Schéma konvekční brzdy [39]

Ohyb potrubí

Tento typ tepelné pasti je velmi efektivní a zároveň jednoduchý. Podobně jako konvekční brzda pracuje na principu rozdílu hustoty teplejší a studenější vody. Studenější voda v připojeném potrubí bude mít vždy tendenci se vrstvit pod teplou vodou v zásobníku tepla. Ohybem potrubí se tedy zamezí recirkulaci v potrubí, neboť vychladlá voda s vyšší hustotou nemůže vystoupat o výšku ohybu do místa, kde je voda s vyšší teplotou, a tedy nižší hustotou.

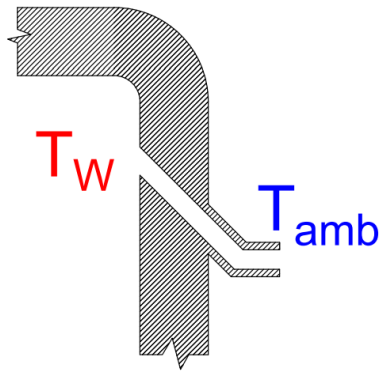
Potrubí může být ohnuto více způsoby. Nejčastěji se ohyb provádí do písmene Z (viz obr. 4.9), ale je možný i do písmene U, obráceného U, či do smyčky. U této tepelné pasti by se pro úplnost mělo zaznamenat, o kolik připojené potrubí kleslo oproti přípojce do zásobníku tepla (délka vertikální trubky), na obrázku níže je tato vzdálenost vyznačena [32][40].



Obrázek 3.9. - Schéma zabránění jevu recirkulace potrubím pomocí jeho ohybu potrubí do tvaru Z [36]

Šikmé napojení

Šikmé napojení nátrubku zásobníku tepla se z pravidla provádí pod úhlem 45° . Tento typ tepelné pasti funguje na stejném principu jako u ohybu potrubí. Studenější voda v připojeném potrubí bude mít vždy tendenci se vrstvit pod teplou vodou v zásobníku tepla. Tím, že napojení na zásobník tepla bude šikmé, zamezí se vnitřní recirkulaci v potrubí. Schéma šikmého napojení na zásobník tepla je uvedeno na obrázku 4.10. Pro úplnost by se u této tepelné pasti mělo zmínit o kolik připojené potrubí kleslo oproti napojení do zásobníku tepla podobně jako u ohybu potrubí [32].



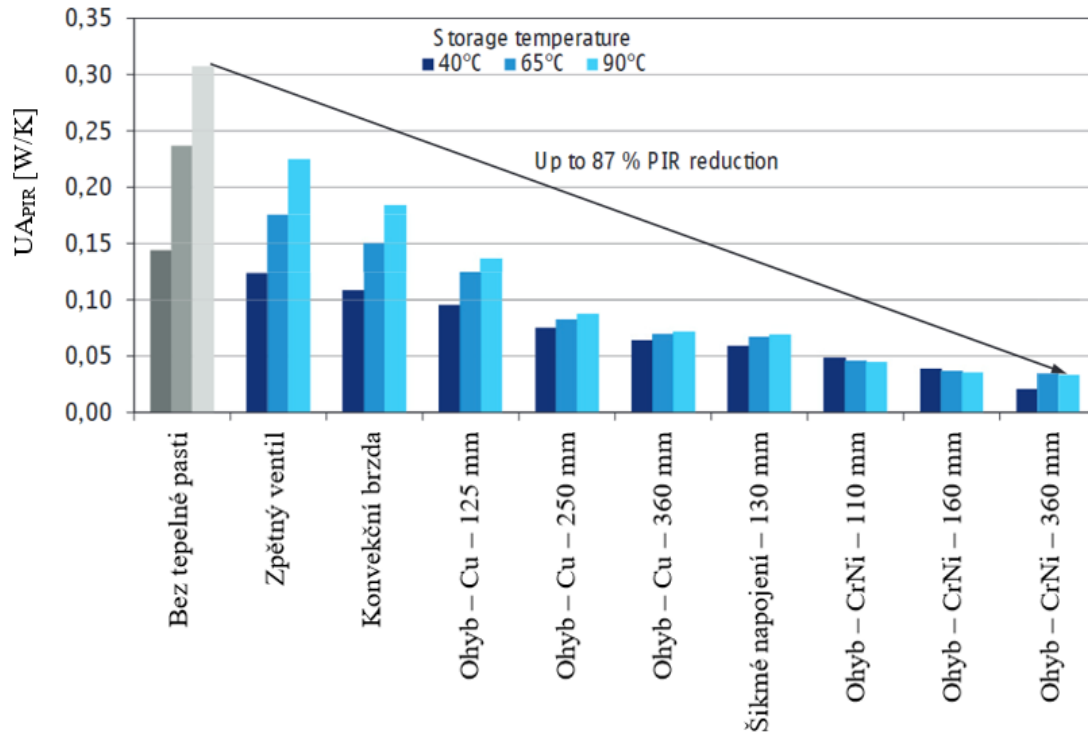
Obrázek 3.10. - Schéma šikmého napojení na zásobník tepla

3.2.2 Porovnání tepelných pastí

Srovnáním jednotlivých tepelných pastí se věnoval Jan Steinweck v článku Pipe Internal Recirculation in Storage Connections – An Unseen Efficiency Barrier. V jeho práci porovnával vliv těchto tepelných pastí:

- Zpětný ventil.
- Konvekční brzda.
- Ohyb v potrubí (do písmene „Z“, různé délky vertikální trubky, různé materiály).
- Šikmé napojení (130 mm).

Srovnání bylo provedeno tak, že každá tepelná past byla vložena mezi vývod zásobníku tepla a připojovací vodorovnou měděnou trubkou. Konkrétně se jedná o Cu 22x1 mm o délce 6,5 m, která byla vybavena tepelnou izolací o šířce 25 mm. Poté se porovnávali měrné tepelné ztráty způsobené vnitřní recirkulací potrubím. Srovnání bylo provedeno pro tři teploty vody uvnitř zásobníku tepla (90 °C, 65 °C, 40 °C) (viz graf na obrázku 4.11).



Obrázek 3.11 - Omezení tepelné ztráty recirkulací potrubí jednotlivými tepelnými brzdami [32]

Z grafu na obrázku 4.11 je zřejmé, že ohyb potrubí je velmi efektivní tepelná past. Ve výsledcích se promítá důležitost délky vertikální trubky. Čím je delší, tím dosahuje tepelná past vyššího omezení měrné tepelné ztráty. Výsledek měření značně ovlivňuje materiál tepelné pasti. Ohyby trubek z méně vodivého materiálu CrNi jsou výrazně efektivnější. Dokonce až tak, že ohyb z CrNi s délkou vertikální trubky 110 mm zamezí vnitřní recirkulaci potrubím lépe než ohyb z Cu s třikrát delší vertikální trubkou (360 mm). Při měření s ohybem z materiálu CrNi s délkou vertikální trubky 360 mm byl dosažen nejlepší výsledek.

Šikmé přípojovací kusy vyrobené z oceli (umístěné v izolaci zásobníku) se také dají považovat za výbornou tepelnou past. Nicméně, náročnost na správnou instalaci izolačního materiálu kolem nakloněného potrubí je vyšší a je třeba počítat s dodatečným tepelným mostem.

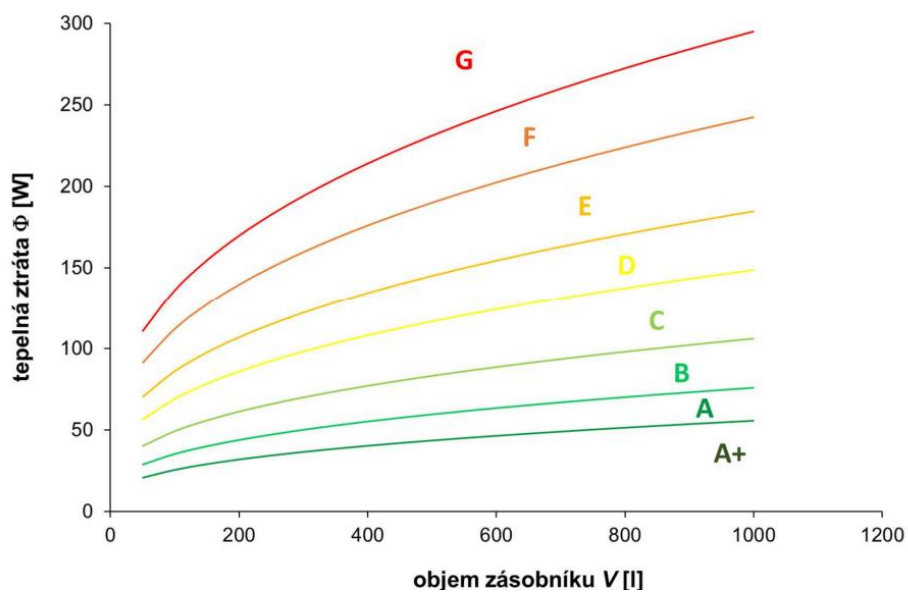
Z grafu na obrázku 4.11 je zřejmé, že zpětný ventil i konvekční brzda jsou oproti ostatním tepelným brzdám výrazně horší. I u těchto dvou typů tepelných brzd je zřejmé, že úbytek měrné tepelné ztráty je značný oproti verzi, kdy nebyla použita žádná tepelná past.

4. Energetické štítky pro zásobníky teplé vody

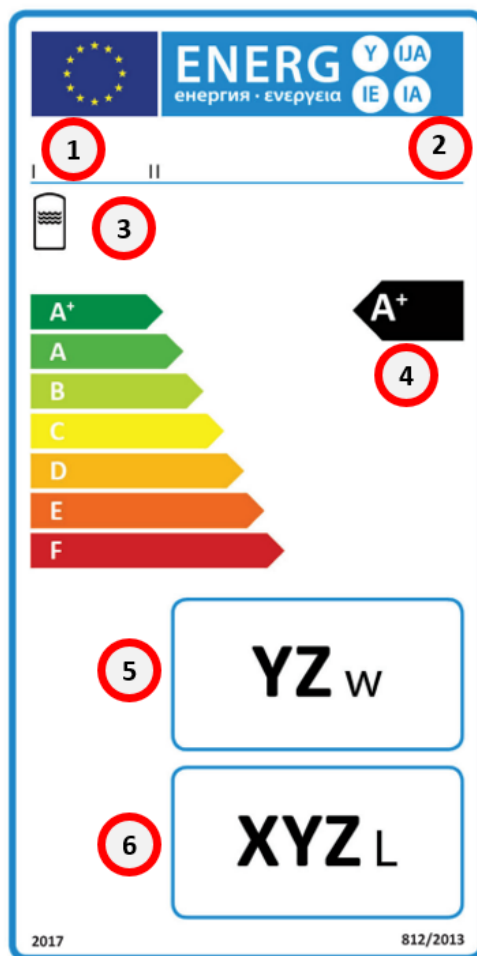
Energetické štítky jsou zavedeným nástrojem pro informování energetické náročnosti. Poskytují zákazníkům možnost výběru dle třídy energetické účinnosti a vytváří konkurenční prostředí mezi výrobci. Povinnosti poskytovat energetický štítek nabývají i zásobníky teplé vody, musí být trvale označeny buď štítkem nebo nálepkou viditelnými i po instalaci. Ty jsou definovány evropskými nařízeními. Tepelné zásobníky spadají do kategorie „ohříváče vody“, kterou se konkrétně zabývá nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) č. 812/2013. Tříd energetické účinnosti je celkem sedm. Dříve byla stupnice definovaná od A do G. Nyní se používá značení od A+ do F, které platí od 26. 9. 2017. Třída energetické účinnosti je závislá na statické ztrátě (S) a na objemu (V) zásobníku teplé vody. Vypočte se podle vzorců uvedených na obrázku níže [41] [42].

Třída energetické účinnosti	Statická ztráta S ve watttech při užitném objemu V v litrech
A+	$S < 5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4}$
A	$5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4}$
B	$8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4} \leq S < 12 + 5,93 \cdot V^{0,4}$
C	$12 + 5,93 \cdot V^{0,4} \leq S < 16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4}$
D	$16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4} \leq S < 21 + 10,33 \cdot V^{0,4}$
E	$21 + 10,33 \cdot V^{0,4} \leq S < 26 + 13,66 \cdot V^{0,4}$
F	$26 + 13,66 \cdot V^{0,4} \leq S < 31 + 16,66 \cdot V^{0,4}$
G	$S > 31 + 16,66 \cdot V^{0,4}$

Obrázek 4.1. - Výpočet energetické třídy zásobníků teplé vody [41]



Obrázek 4.2. - Přehledné zobrazení energetických tříd účinností zásobníků teplé vody [27]



Obrázek 4.3. - Příklad energetického štítku pro zásobníky teplé vody podle 812/2013 [41]

Energetický štítek musí obsahovat tyto informace:

1. název nebo ochranná známka dodavatele,
2. identifikační značka modelu dodavatele,
3. funkce zásobníku vody,
4. třída energetické účinnosti stanovená v souladu s přílohou II bodem 2; hrot šipky udávající třídu energetické účinnosti zásobníku teplé vody je umístěn ve stejné výšce jako hrot šipky příslušné třídy energetické účinnosti,
5. stálé ztráty ve W zaokrouhlené na nejbližší celé číslo,
6. objem zásobníku teplé vody v litrech zaokrouhlený na nejbližší celé číslo.

4.1 Vliv objemu zásobníku tepla na tepelnou ztrátu

4.1.1 Nařízení komise (EU) č. 814/2013

Z grafu na obrázku 5.2 je zřejmé, že statická ztráta závisí na objemu zásobníku. V nařízení komise (EU) č. 814/2013 je od 26. září 2017 vyjádřena nejvyšší přípustná tepelná ztráta Φ [W]. Tuto hodnotu nesmí tepelná ztráta zásobníků o určitém objemu přesahovat. Hodnota nejvyšší přípustné tepelné ztráty se stanoví podle

$$\Phi = 16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4} \quad (5.1)$$

kde je

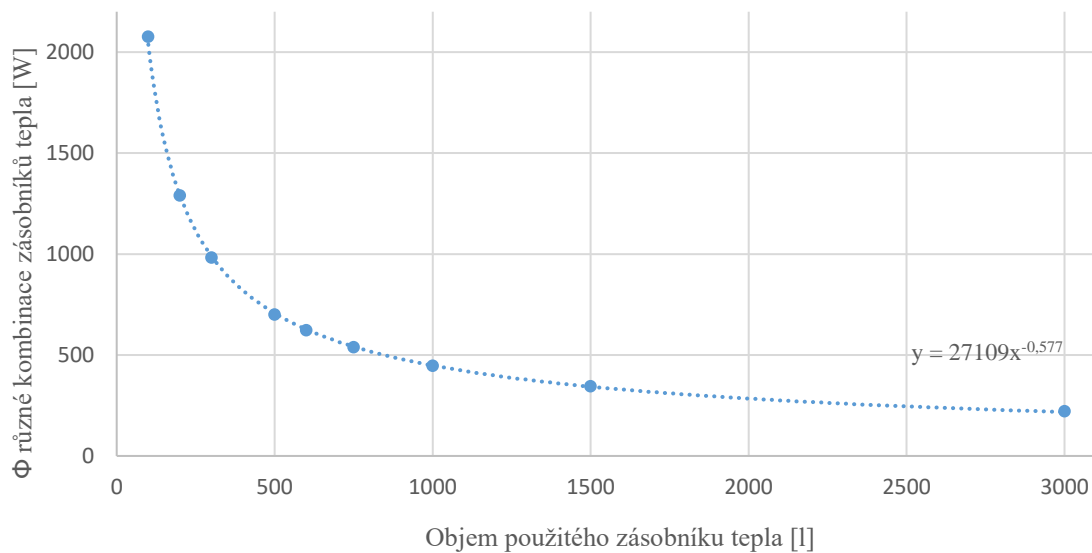
V objem zásobníku tepla [l] [43].

Z tohoto vzorce a z obr. 5.2 je zřejmé, že od 26. září 2017 smí zásobníky tepla nabývat nejhůře energetické třídy C. Energetické třídy mohou tedy dosahovat pouze 4 hodnot, a to: A+, A, B, C.

V této části je porovnána maximální tepelná ztráta podle normy 814/2013 pro uskladnění 3000 l za použití různého počtu jinak velkých zásobníků teplé vody. Konkrétně byli použity tyto objemy v litrech: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000. Pro každý objem byla vypočtena maximální přípustná tepelná ztráta dle vzorce (5.1). Poté byla vynásobena počtem zásobníků, aby pokryla požadavek uskladnění 3000 l (viz tab. 5.1).

Tabulka 4.1. - Přehled maximální přípustné tepelné ztráty pro celkový objem 3000 litrů, za použití různě velkých zásobníků

Objem zásobníku [l]	Maximální Φ zásobníku dle 814/2013 [W]	Počet zásobníků pro celkový objem 3000 l	Tepelná ztráta pro celkový objem 3000 [l]
100	69	30	2077
200	86	15	1290
300	98	10	982
500	117	6	700
600	124	5	621
750	131	4	656
1000	149	3	446
1500	172	2	344
3000	222	1	222



Obrázek 4.4 - Závislost maximální tepelné ztráty za použití různě velkých zásobníků o různém množství

Z výše uvedeného grafu a tabulky je zřejmé, že nejvýhodnější je skladovat vodu v co nejmenším počtu zásobníků tepla. Nejnižší tepelné ztráty dosáhne zásobník o objemu přesně 3000 l. S rostoucím počtem použitých zásobníků i přes stejný objem roste celková tepelná ztráta systému akumulace tepla. Tepelná ztráta roste z důvodu navyšování poměru ochlazovaného povrchu zásobníků ku objemu teplé vody uvnitř.

4.1.2 Výpočet vlivu objemu na tepelnou ztrátu

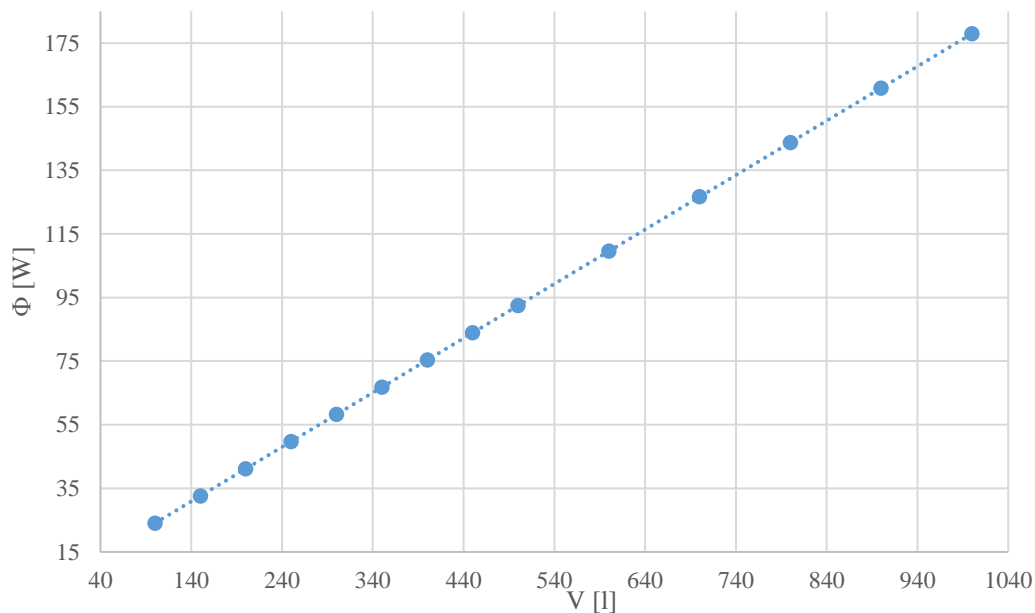
V této části bude zkoumán vliv objemu zásobníku na jeho tepelnou ztrátu. Bude použit poupravený model z předchozích kapitol 3.1.3 a 3.1.4. Výpočet tepelné ztráty bude identický jako v těchto kapitolách. Změna modelu se týká tloušťka tepelné izolace pláště. Ta bude v tomto případě konstantní $\delta_2 = 100$ mm. Rozdílná bude také tloušťka izolace na dnu a na víku, nyní bude nabývat stejných hodnot jako je tloušťka izolace pláště zásobníku $\delta_{22} = 100$ mm. Teplota vody bude v tomto případě konstantní $T_W = 65$ °C.

Změna výšky zásobníku tepla

V této části nastane oproti přechozím modelům rozdíl ve výšce zásobníku tepla, ta bude proměnná. Bude se pohybovat mezi hodnotami 0,5 m až 5 m. S měnící výškou zásobníku se bude měnit i jeho objem, a to od 100 l do 1000 l (viz tab. 5.2).

Tabulka 4.2. - Vliv výšky zásobníku na jeho tepelnou ztrátu

Výška H [m]	Objem V [l]	Tepelná ztráta Φ [W]
0,5	100	24
0,8	150	33
1,0	200	41
1,3	250	50
1,5	300	58
1,8	350	67
2,0	400	75
2,3	450	84
2,5	500	92
3,1	600	110
3,6	700	127
4,1	800	144
4,6	900	161
5,1	1000	178



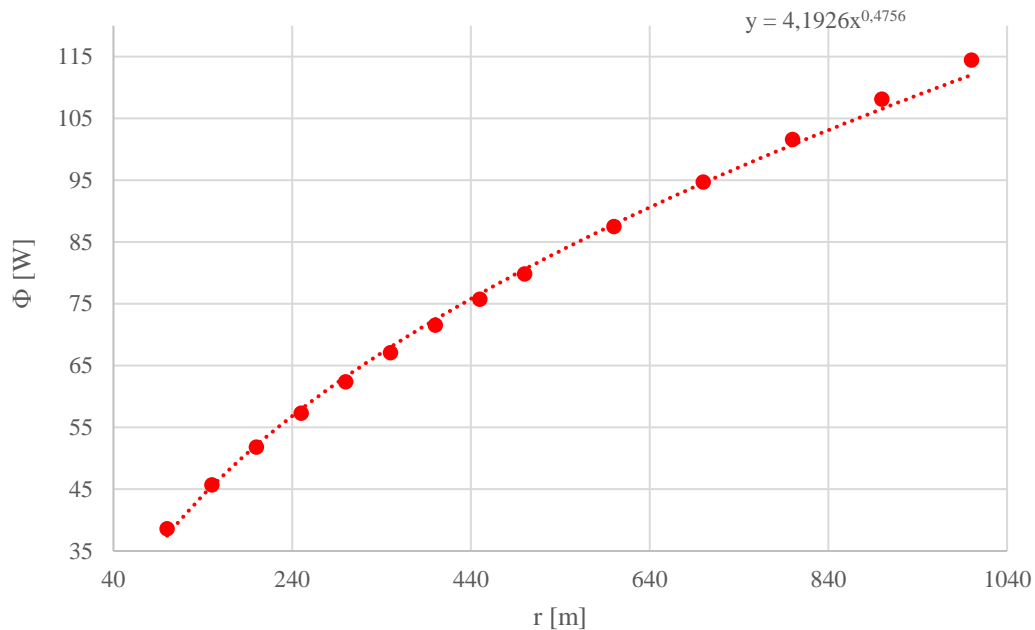
Obrázek 4.5. - Vliv změny objemu (výšky zásobníku) na tepelnou ztrátu

Změna vnitřního poloměru zásobníku tepla

V této části bude využit opět stejný model jako v předchozí kapitole. Změna nastane u výšky zásobníku, která bude v tomto případě konstantní. Proměnný bude vnitřní poloměr zásobníku. Ten se bude pohybovat mezi hodnotami 0,13 m až 0,42 m. S měnícím se poloměrem se bude měnit i objem, a to opět od 100 l do 1000 l (viz tab. 5.3).

Tabulka 4.3. - Vliv vnitřního poloměru zásobníku na jeho tepelnou ztrátu

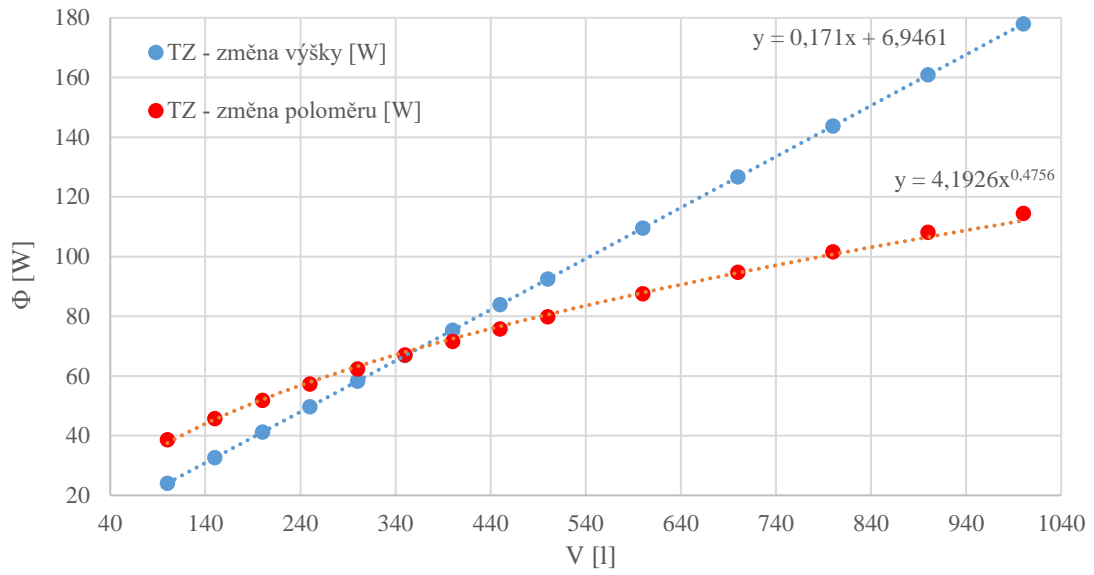
Poloměr - r [m]	V zásobníku [l]	Tepelná ztráta Φ [W]
0,13	100	38,6
0,16	150	45,7
0,19	200	51,8
0,21	250	57
0,23	300	62
0,25	350	67
0,27	400	72
0,28	450	76
0,30	500	80
0,33	600	88
0,35	700	95
0,38	800	102
0,40	900	108
0,42	1000	114



Obrázek 4.6 - Vliv změny objemu (poloměru zásobníku) na tepelnou ztrátu

Srovnání vlivu výšky a vnitřního poloměru na tepelnou ztrátu

Z grafu na obrázku 5.7 je zřejmé, že tepelná ztráta obecně roste se zvyšujícím se objemem. V prvním případě, kdy se mění pouze výška zásobníku, roste tepelná ztráta lineárně. V druhém případě, ve kterém se mění vnitřní poloměr zásobníku tepla, roste tepelná ztráta pomocí mocninné funkce, uvedené v grafech na obrázcích 5.6 a 5.7. Exponent, který umocňuje hodnotu objemu, nabývá hodnoty 0,4756. V nařízení komise (EU) č. 814/2013 se pro stanovení nejvyšší přípustné tepelné ztráty umocňuje objem číslem 0,4. Z grafů a tabulek je také patrné, že při vyšších objemech je výhodnější zkonstruovat zásobník širší. Například pro objem 1000 l se tepelná ztráta liší téměř dvojnásobně. Pro malé objemy je naopak výhodnější zhotovit zásobník vyšší. Tyto výpočetní modely budou uvedeny v příloze této diplomové práce.



Obrázek 4.7. – Porovnání vlivu změny výšky a poloměru zásobníku na tepelnou ztrátu

5. Stanovení tepelné ztráty experimentem

V této práci byla experimentálně zkoumána tepelná ztráta na dvou různě velkých vodních zásobnících tepla. Konkrétně se jednalo o kombinovanou akumulční nádrž HSK 390 P, dále uváděn jako **Zásobník 398 l (VZ)**, a zásobník R2BC 300, dále uváděn jako **Zásobník 282 l (MZ)**.

5.1 Popis měřených vodních zásobníků tepla

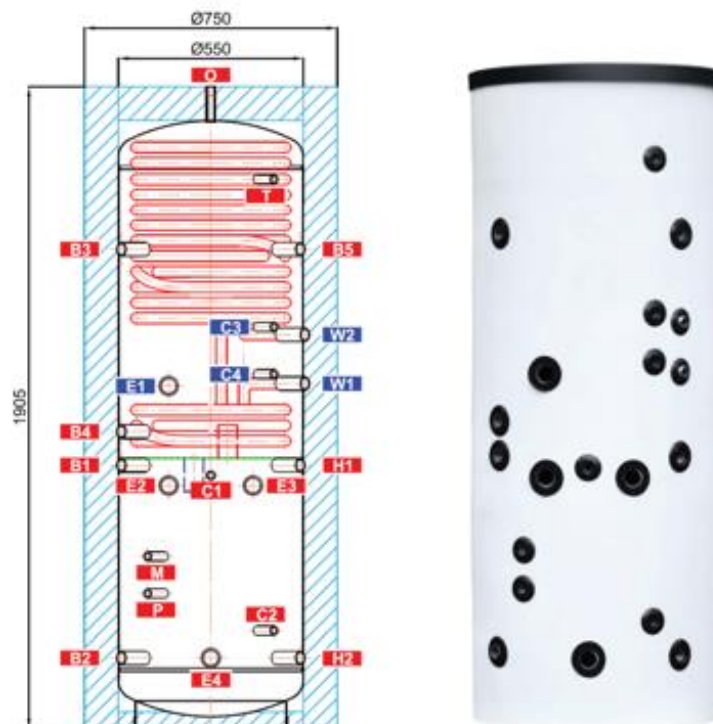
5.1.1 Zásobník 398 l

Jedná se o kombinovanou akumulční nádrž s přípravou teplé vody v integrovaném nerezovém výměníku, opatřená těsným dělicím plechem. Tento zásobník má celkem 21 nátrubků. Vlastnosti tohoto zásobníku jsou:

objem zásobníku: $V = 398 \text{ l}$

výška zásobníku: $H = 1,905 \text{ m}$,

vnitřní poloměr zásobníku: $r_1 = 0,275 \text{ m}$,



Obrázek 5.1. - Zobrazení zásobníku 398 l

Plášť a víko zásobníku jsou uvažovány trojvrstvé. Dno zásobníku je tvořeno pouze konstrukční ocelí. Parametry jednotlivých vrstev jsou neměnné, až na součinitel tepelné vodivosti tepelné izolace.

Jednotlivé vrstvy pláště:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_1 = 0,002 \text{ m}$,
 $\lambda_1 = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace – fleece: $\delta_2 = 0,1 \text{ m}$,
 λ_2 – proměnná $\lambda_2 (T = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0456 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,
 $\lambda_2 (T = 50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0486 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 3) Povrch izolace – PVC: $\delta_3 = 0,001 \text{ m}$,
 $\lambda_3 = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Jednotlivé vrstvy víka:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_{11} = 0,002 \text{ m}$,
 $\lambda_{11} = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace – fleece: $\delta_{22} = 0,1 \text{ m}$,
 λ_{22} - proměnná $\lambda_{22} (T = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0456 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,
 $\lambda_{22} (T = 50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0486 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 3) Povrch izolace – PVC: $\delta_{33} = 0,001 \text{ m}$,
 $\lambda_{33} = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu pláště a víka zásobníku je:

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

Jednotlivé vrstvy dna:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_{111} = 0,002 \text{ m}$,
 $\lambda_{111} = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

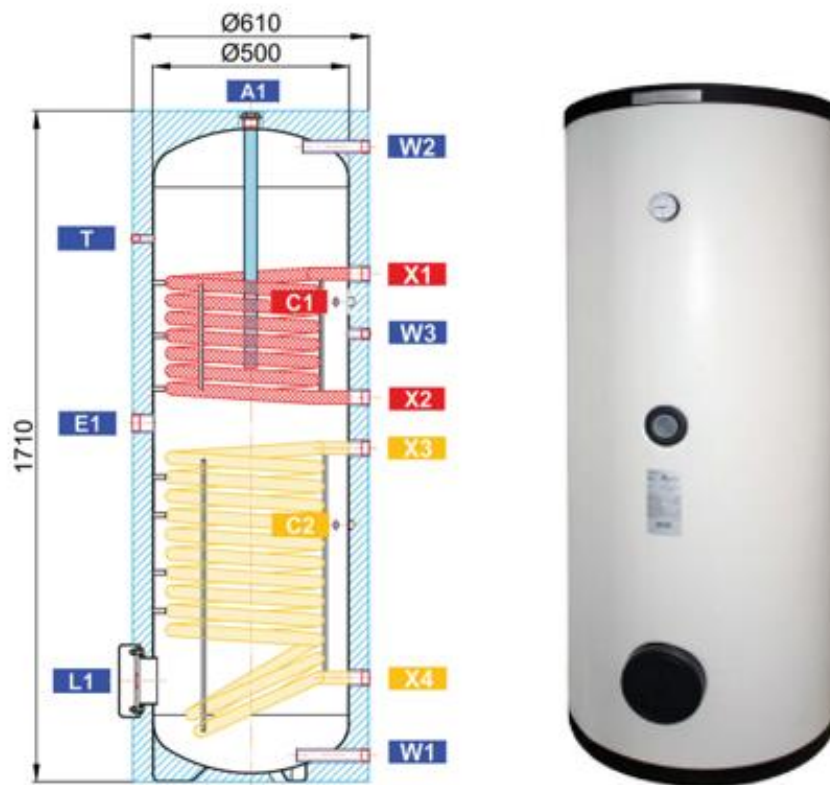
5.1.2 Zásobník 282 l

Tento zásobník má dva integrované smaltované výměníky z nerezové oceli. Slouží pro přípravu teplé vody. Má celkem 10 nátrubků. Vlastnosti tohoto zásobníku jsou:

objem zásobníku: $V = 282 \text{ l}$

výška zásobníku: $H = 1710 \text{ mm}$,

vnitřní poloměr zásobníku: $r_1 = 0,25 \text{ m}$,



Obrázek 5.2. - Zobrazení zásobníku 282 l

Plášť a víko zásobníku jsou uvažovány opět trojvrstvé. Dno zásobníku je tvořeno pouze konstrukční ocelí a užší vrstvou izolace. Parametry jednotlivých vrstev jsou neměnné, až na součinitel tepelné vodivosti tepelné izolace.

Jednotlivé vrstvy pláště:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_1 = 0,002 \text{ m}$,
 $\lambda_1 = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace – PUR: $\delta_2 = 0,05 \text{ m}$,
 λ_2 - proměnná $\lambda_2 (T = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0404 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,
 $\lambda_2 (T = 50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0434 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 3) Povrch izolace – PVC: $\delta_3 = 0,001 \text{ m}$,
 $\lambda_3 = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Jednotlivé vrstvy víka:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_{11} = 0,002 \text{ m}$,
 $\lambda_{11} = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace – PUR: $\delta_{22} = 0,01 \text{ m}$,
 λ_{22} - proměnná $\lambda_{22} (T = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0404 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,
 $\lambda_{22} (T = 50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0434 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 3) Povrch izolace – PVC: $\delta_{33} = 0,001 \text{ m}$,
 $\lambda_{33} = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu pláště a víka zásobníku je:

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

Jednotlivé vrstvy dna:

- 1) Konstrukční ocel S235JR: $\delta_{111} = 0,002 \text{ m}$,
 $\lambda_{111} = 51,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- 2) Izolace – PUR: $\delta_{222} = 0,01 \text{ m}$,
 λ_{222} - proměnná $\lambda_{222} (T = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0404 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,
 $\lambda_{222} (T = 50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0434 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

5.2 Příprava měření

Experiment probíhal v laboratořích Univerzitého centra energeticky efektivních budov (UCEEB ČVUT) v Buštěhradu. Pro měření různých veličin při experimentu pro stanovení tepelné ztráty obou zásobníků byla použita následující zařízení:

- Čidla teploty Pt100 typ 02050, zapojená čtyřvodičově
- Digitální termostat W1209
- Elektroměr Maneler 9901D
- Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2

Oba zkoumané zásobníky byly umístěny na dřevěnou paletu tak, že byly umístěny cca 140 mm nad podlahou. Oba byly také vzdáleny od okolních stěn alespoň o 700 mm, splňovaly tak podmínky uvedené v normě ČSN EN 12897. Při měření nebyla zařízení vystavena přímému slunečnímu záření. Je nutné počítat s tím, že při změně teplot bude voda uvnitř zásobníků měnit svůj objem, je tedy nutné připojit k zásobníku expanzní nádobu.

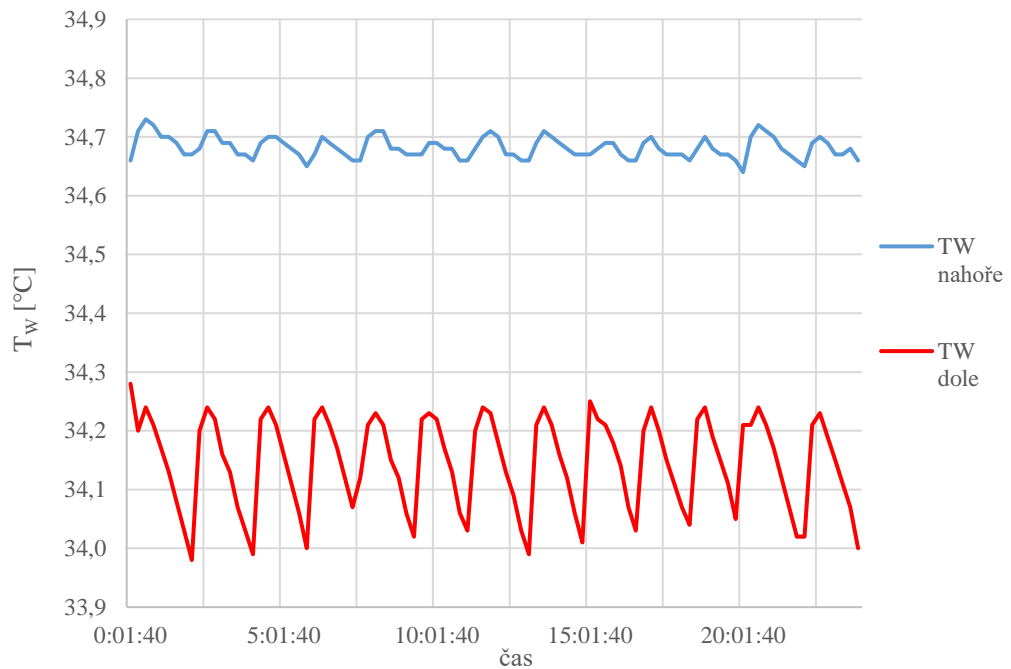
Po celou dobu experimentu byla měřena teplota vody pomocí teplotních čidel Pt100 toleranční třídy převodníku A dle ČSN EN 60751. Tato teplota byla měřena ve dvou výškách. V zásobníku 398 l byly měřeny teploty ve výškách 280 mm a 1620 mm od nejnižší hrany zásobníku, v druhém zásobníku ve výškách 240 mm a 1360 mm.

Teplota vody byla také monitorována pomocí digitálního termostatu s tolerancí 1 %, který byl umístěn ve výšce 1040 mm v zásobníku 398 l a 620 mm v zásobníku 282 l. Na tomto termostatu se později nastavila požadovaná teplota vody. Digitální termostat poté s hysterezí 0,1 K spínal horizontálně namontované topné těleso. To mělo zásobníku 398 l příkon 2 kW a bylo umístěno 200 mm od nejnižší hrany zásobníku. V zásobníku 282 l činil příkon topného tělesa 400 W, jeho poloha byla pouhých 50 mm ode dna zásobníku.

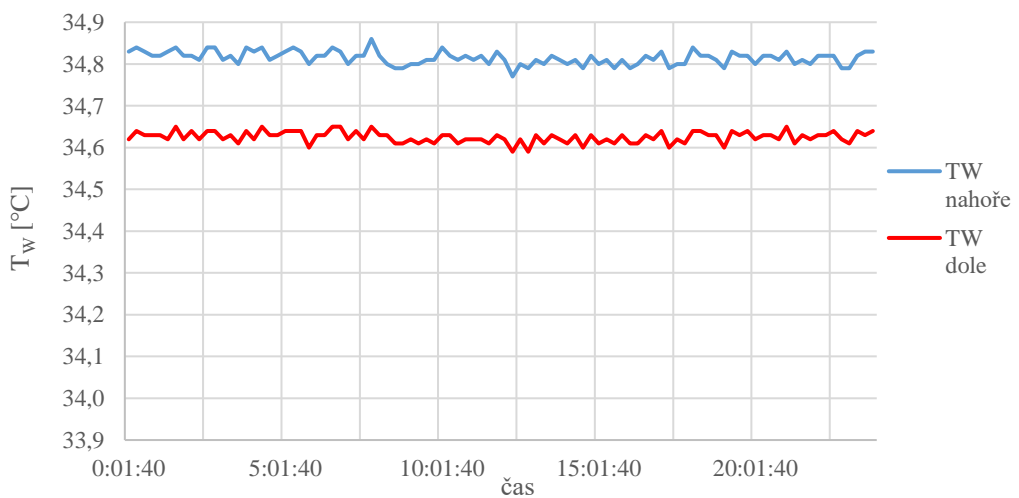
5.3 Postup měření

Poté, co je vše připraveno, se musí zásobník tepla napustit studenou vodou. To, že je zásobník tepla naplněn, poznáme tak, že začne vytékat voda od vzdušňovací trubkou, která je umístěna v horní části zásobníku tepla.

Poté se spustí topné těleso, které je nastaveno tak, aby ohřálo objem vody v zásobníku na předem nastavenou teplotu, která je dále trvale udržována digitálním termostatem. Tepelná ztráta se při experimentu stanovovala při teplotě vody mezi 35 °C a 70 °C. Průběh teploty vody v zásobnících pro $T_w = 34$ °C je zobrazen v grafech na obrázcích 6.3 a 6.4. Teplota okolního vzduchu po celou dobu experimentu pohybovala $T_{amb} = 21,5$ °C \pm 1 K,



Obrázek 5.3. - Průběh teploty vody uvnitř zásobníku 398 l



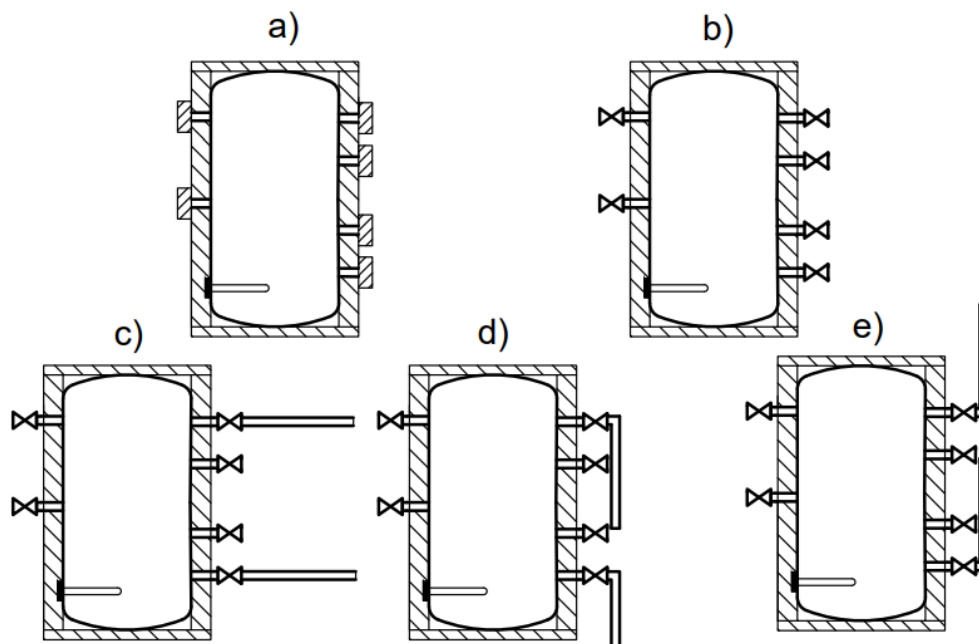
Obrázek 5.4. - Průběh teploty vody uvnitř zásobníku 282 l

Z grafů na obrázcích 6.3 a 6.4 si lze všimnout teplotního vrstvení vody v zásobnících. Čidlo teploty v horní části zásobníku zaznamenává vyšší teploty než čidlo v dolní části. Teplota vody v zásobníku 398 l se udržuje teplotu mezi 34 °C a 34,80 °C. V zásobníku 282 l se teplota vody pohybuje mezi 34,60 a 34,85. Je také nutné zmínit, že teplota okolního vzduchu byla při všech měřeních udržována kolem hodnoty 21,5 °C ± 1 K.

5.4 Stanovení tepelné ztráty

Měření probíhalo vždy ve 24 hodinových intervalech po ustálení teploty v zásobnících. V každém 24 hodinovém intervalu se odečetla energie spotřebovaná topným tělesem pomocí elektroměru Maneler 9901D v kWh. Poté se podle normy ČSN EN 12897 stanovila tepelná ztráta vodních zásobníků pomocí vzorců v kapitole 3.2.1. Tepelná ztráta byla stanovena pro takto upravený zásobník:

- Dokonale zaizolovaný, samotný zásobník.
- Zásobník s připojenými ventily (VZ - 15 ventilů, MZ – 8 ventilů).
- Zásobník s připojenými ventily a s dvěma trubkami.
- Zásobník s připojenými ventily a s dvěma trubkami ohnutými dolů.
- Zásobník s připojenými ventily a s dvěma trubkami ohnutými nahoru.
- Zásobník s připojenými ventily a s čtyřmi trubkami.
- Zásobník s připojenými ventily a s čtyřmi trubkami ohnutými dolů.
- Zásobník s připojenými ventily a s čtyřmi trubkami ohnutými nahoru.



Obrázek 5.5. - Zobrazení různě upraveného zásobníku tepla

Na obrázku lze vidět přehledné zobrazení různě upraveného zásobníku tepla. Případ f), g) a h) na obrázku není uveden. Jeho provedení je však identické s případy c), d) a e), jediný rozdíl nastává v dvojnásobném počtu připojených trubek. Připojené ventily jsou konkrétně kulové uzávěry vody – perfecta, velikosti „1“, trubky jsou Cu22x1 dlouhé vždy 1 m, opatřeny izolací. Fotky různě upravených zásobníků jsou umístěny v přílohách.

5.4.1 Výsledky tepelné ztráty zásobníku 398 l

Je nutné zmínit, že teplota vody zásobníku 398 l a teplota okolního vzduchu nebyla ve všech případech identická. Proto porovnání tepelné ztráty Φ [W] není ideální. Zkoumání stanovené měrné tepelné ztráty UA [W/K] pomocí vzorce (3.4), při různě osazeném zásobníku, problémy rozdílů teplot eliminuje (viz graf na obr. 6.6 a 6.7).

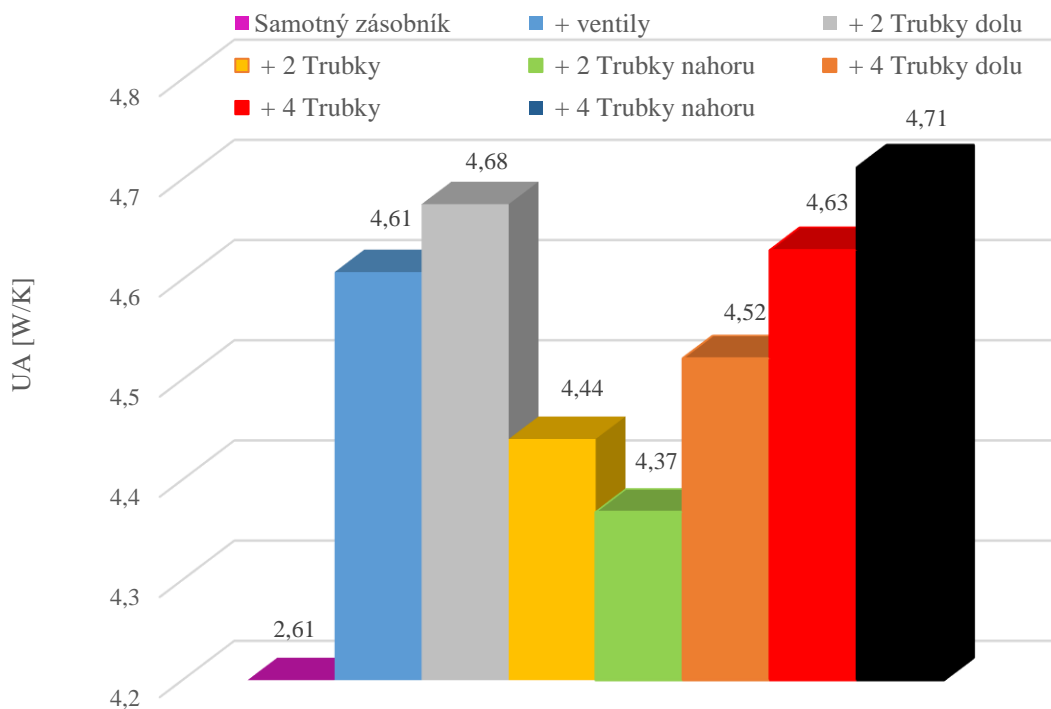
Tabulka 5.1. - Tepelná ztráta zásobníku 398 l při různých teplotách a různém osazení

Různé osazení zásobníku 398 l	UA [W/K] $T_w \sim 37^\circ\text{C}$	UA [W/K] $T_w \sim 61^\circ\text{C}$
VZ – samotný	2,61	2,85
VZ + ventily (15 ventilů)	4,61	5,12
VZ+ ventily + 2x trubka_dolu	4,68	5,02
VZ + ventily + 2x trubka	4,44	5,13
VZ + ventily + 2x trubka_nahoru	4,37	5,22
VZ + ventily + 4x trubka_dolu	4,52	5,17
VZ + ventily + 4x trubka	4,63	5,49
VZ + ventily + 4x trubka_nahoru	5,71	5,67

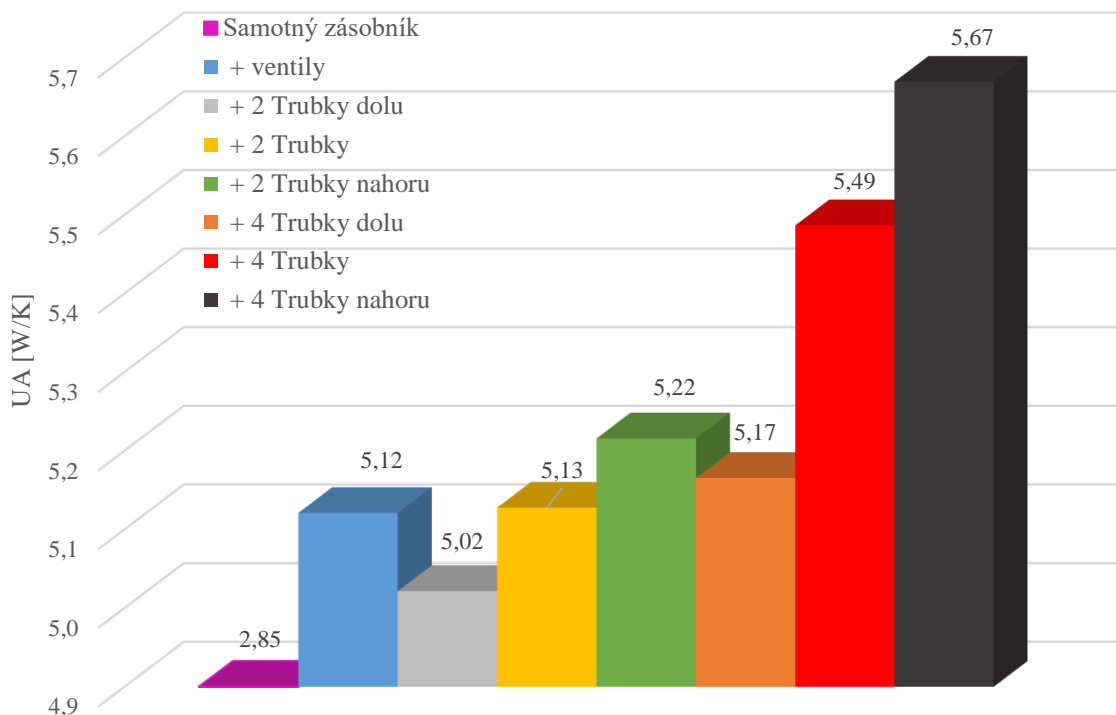
Z tabulky 6.1 a grafech na obrázcích 6.5 a 6.6 je zřejmé, že měrná tepelná ztráta zásobníku 398 l mírně roste při zvyšující se teplotě vody uvnitř. Také se dá vyčíst, že měrná tepelná ztráta zaizolovaného samotného zásobníku je vždy nejnižší, a to kvůli tomu, že zásobník není vystaven dodatečným tepelným ztrátám. Můžeme si všimnout, že přidání ventilů má nejvyšší vliv na růst měrné tepelné ztráty. Rozdíl mezi měrnou tepelnou ztrátou samotného zásobníku 398 l a s ventily a čtyřmi trubkami ohnutými nahoru činí při $T_w \sim 37^\circ\text{C}$ 3,1 W/K. Při teplotách vody $T_w \sim 61^\circ\text{C}$ činí rozdíl tepelné ztráty mezi takto osazenými malými zásobníky 2,82 W/K. V případě, ve kterém je uvažovaný $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, činí tento rozdíl 139,5 W a 126,9 W.

U nižších teplot vody nedochází po napojení trubek k zásobníku k výraznému navýšení měrné tepelné ztráty. Při vyšších teplotách je růst měrné tepelné ztráty značnější. U nižších teplot dokonce často vychází hodnota měrné tepelné ztráty s přidanou trubicou nižší než v případě bez ní. Při vysokých teplotách takto nesedí pouze tepelná ztráta s dvěma trubicami směřujícími směrem dolů. To se děje kvůli nejistotě měření, u nižších teplot, kdy nárůst tepelné není tak výrazný, se nejistota projevuje značněji.

Nejistota měření nastává z části kvůli nepřesnosti čidel. Je však také důležité zdůraznit, nejistotu z důvodu rozlišných podmínek při měření. V místnosti byla udržována téměř konstantní teplota vzduchu (± 1 K). Je však možné, že proud vzduchu vzniklý otevřením dveří, mohl ovlivnit měření. Je možné, že v některých případech mohla být izolace z připevněných trubek mírně stažená. Také je možné, že připevněné trubky nemusely být vždy dokonale vodorovné. I nevýrazným nakloněním připojené trubky se zvýhodní či omezí podmínky pro vznik vnitřní recirkulace v potrubí, která má na tepelnou ztrátu výrazný vliv. Zásobníky tepla se také mezi měřeními vždy nevypustily a nenapustily studenou vodou, která se pak zahřála na požadovanou teplotu. Je tedy možné, že pod víkem zásobníku mohla zůstat vrstva horké vody, která snižovala tepelnou ztrátu při dalším měření.



Obrázek 5.6. - Porovnání měrné tepelné ztráty zásobníku 398 l při nižších teplotách



Obrázek 5.7. - Porovnání měrné tepelné ztráty zásobníku 398 l při vyšších teplotách

Z grafu na obrázku 6.7 lze jasně vidět růst měrné tepelné ztráty s přidáním trubkami. Z tohoto grafu lze přehledně vyčíst, jak se mění měrná tepelná ztráta při ohybu trubek nahoru a dolů. Z grafu na obrázku 6.6 je patrná nepřesnost měření. Ta se při nižších teplotách projevuje značněji. Například u dvou trubek se ohyb trubky projeví opačným způsobem, než by měl. Také si lze všimnout, že měrná tepelná ztráta s dvěma trubkami navíc vykazuje nižší měrnou tepelnou ztrátu než bez nich.

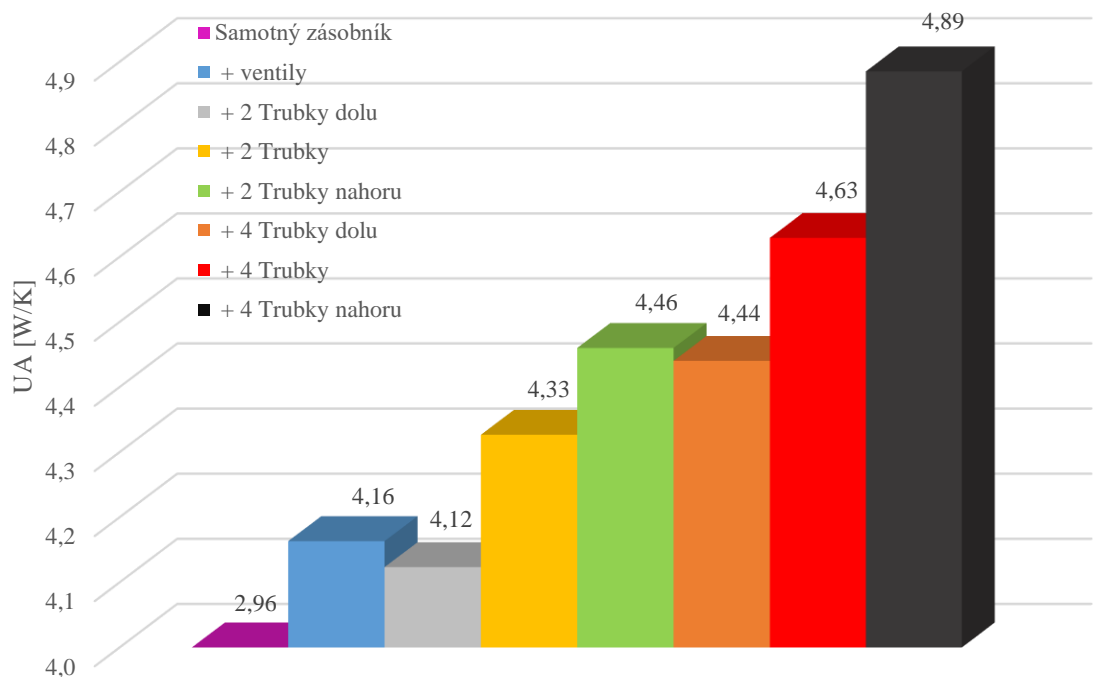
5.4.2 Výsledky tepelné ztráty zásobníku 282 l

Tabulka 5.2. - Tepelná ztráta zásobníku 282 l při různých teplotách a různém osazení

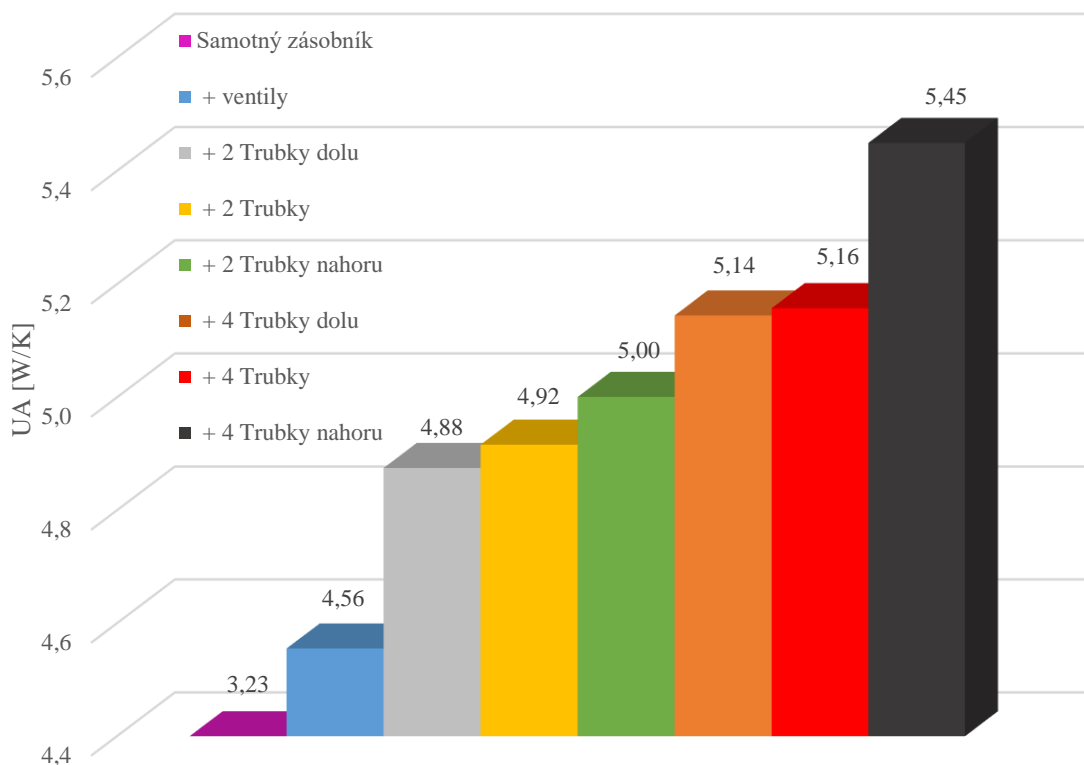
Různé osazení zásobníku 282 l	UA [W/K] při $T_w \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$	UA [W/K] při $T_w \sim 57 \text{ }^\circ\text{C}$
MZ - samotný	2,96	3,23
MZ + ventily (8 ventilů)	4,16	4,56
MZ + ventily + 2x trubka_dolu	4,12	4,88
MZ + ventily + 2x trubka	4,33	4,92
MZ + ventily + 2x trubka_nahoru	4,46	5,00
MZ + ventily + 4x trubka_dolu	4,44	5,14
MZ + ventily + 4x trubka	4,63	5,13
MZ + ventily + 4x trubka_nahoru	4,89	5,45

Z tabulky 6.2 a z grafů na obrázcích 6.8 a 6.9 je zřejmé, jako v předešlém případě, že nejnižší měrnou tepelnou ztrátu má samotný zásobník 282 l. S přibývajícími ventily a trubkami měrná tepelná ztráta roste. Můžeme si všimnout, že nejvyšší zvýšení měrné tepelné ztráty nastalo, jako u předchozího zásobníku, po přidání ventilů. Stejně jako u předchozího zásobníku roste se zvyšující se teplotou vody uvnitř. Rozdíl mezi měrnou tepelnou ztrátou samotného zásobníku 282 l a s ventily a čtyřmi trubkami ohnutými nahoru činí při $T_W \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 1,93 W/K. Při teplotách vody $T_W \sim 57 \text{ }^\circ\text{C}$ činí rozdíl tepelné ztráty mezi takto osazenými malými zásobníky 2,22 W/K. V případě, ve kterém je uvažovaný $\Delta T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, činí tento rozdíl 86 W a 100 W.

Z grafů lze také vyčíst, že při nižších teplotách se u zásobníku 282 l neprojevuje nejistota měření tak výrazně jako u předchozího zásobníku. Jediný případ, kdy vycházejí nesprávné výsledky, nastává při stavu s ventily a dvěma ohnutými trubkami směrem dolů. V tomto případě vychází nižší měrná tepelná ztráta než u varianty pouze s ventily.



Obrázek 5.8. – Porovnání měrné tepelné ztráty zásobníku 282 l při nižších teplotách



Obrázek 5.9. - Porovnání měrné tepelné ztráty zásobníku 282 l při vyšších teplotách

Graf na obrázku 6.9 přehledně zaznamenává růst měrné tepelné ztráty s připojenými ventily a poté s přibývajícím trubkami. Lze si všimnout, jak se mění měrná tepelná ztráta při ohybu trubek směrem dolů či nahoru. Někdy je její rozdíl oproti vodorovným trubkám více výrazný, někdy méně. To je dáno nepřesností měření. V tomto případě jde hlavně o to, že vodorovné trubky mohou směřovat pod malým úhlem nahoru nebo dolů. I nevýrazným nakloněním zvýhodní či omezí podmínky pro vznik vnitřní recirkulaci v potrubí, která má na tepelnou ztrátu výrazný vliv.

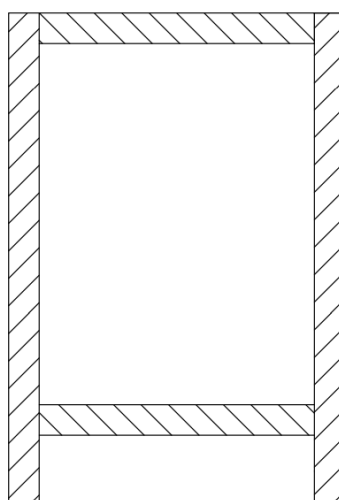
U zásobníku 282 l dochází s připojenými trubkami k výraznějšímu poměrnému zvýšení měrné tepelné ztráty oproti nárůstu u zásobníku 398 l (viz grafy na obrázcích 6.6 až 6.9). Ze zásobníku 282 l totiž vede méně nátrubků, tudíž je osazen méně ventily, konkrétně 8. Oproti tomu je zásobník – 398 l je osazen celkem 15 ventily.

6. Výsledný výpočetní model

Součástí této práce je také vytvořit výpočetní model, jehož výstupem bude hodnota tepelné ztráty zásobníku při osazení různým počtem ventilů různé dimenze a napojení různého počtu trubek daným způsobem (nahoru, vodorovně, dolů). Nejdříve byl vytvořen model, který stanoví tepelnou ztrátu samotného zásobníku v závislosti na teplotě vody uvnitř. Dále byly zkoumány dodatkové ztráty, konkrétně zohlednění vlivu připojených ventilů a trubek na tepelnou ztrátu zásobníku. Výsledky modelu jsou ověřeny výsledky experimentu z kapitoly 6.

6.1 Samotný zásobník

Výsledný výpočetní model stanovující tepelnou ztrátu samotného zásobníku je v této kapitole velmi podobný již uvedenému modelu v kapitolách 3.1.3, 3.1.4 a 5.1.2. Nejdříve se vypočte tepelná ztráta pláště Φ_1 , poté víka Φ_2 a dna Φ_3 . Pro získání výsledné tepelné ztráty samotného zásobníku se tepelné ztráty jednotlivých částí sečtou. Rozdíl mezi výsledným výpočetním modelem a těmi v předchozích kapitolách je výpočet tepelné ztráty dna. Nyní se již nerovná tepelné ztrátě víka, a to proto, že u měřených zásobníků je dno zásobníků od jeho nejnižší hrany pláště odsazeno. Pod zásobníky pak vzniká vzduchová komora (viz obr 7.1). U zásobníku 398 l navíc samotné dno zásobníku není opatřeno tepelnou izolací, u druhého zásobníku tepelná izolace u dna umístěná je, avšak nerovnoměrně a obecně s nižší tloušťkou než u pláště.



Obrázek 6.1. - Zobrazení vzduchové komory vespodu zásobníku

Při výpočtu tepelné ztráty dna u takto konstruovaného zásobníku je nutné zahrnout přenos tepla sáláním, neboť horká stěna zásobníku bez izolace sálá proti výrazně studenější podlaze, jejíž teplota je uvažována jako teplota okolního vzduchu.

Tepelná ztráta dna Φ_3 se stanoví

$$\Phi_3 = \Phi_k + \Phi_S \quad (7.1)$$

kde je

Φ_k tepelná ztráta konvekcí [W],

Φ_S tepelná ztráta sáláním [W].

$$\Phi_k = h_{k,e} \cdot (T_{pd} - T_{amb}) \cdot A; h_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (7.2)$$

kde je

$h_{k,e}$ součinitel přestupu tepla konvekcí na vnějším povrchu [W/m²·K],

T_{pd} teplota vnější stěny dna [°C],

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C],

A plocha dna zásobníku [m²],

Nu Nusseltovo číslo [-],

λ součinitel tepelné vodivosti vzduchu [W/m·K],

L charakteristický rozměr [m].

$$\Phi_S = \varepsilon_{pd} \cdot \varepsilon_{pp} \cdot \sigma \cdot A \cdot \varphi \cdot ((T_{pd} + 273,15)^4 - (T_{pp} + 273,15)^4) \quad (7.3)$$

$\varepsilon_{1,2}$ emisivita povrchu dna zásobníku a podlahy [-],

σ Stefan-Boltzmannova konstanta [W/ m²·K⁴],

A plocha dna zásobníku [m²]

φ součinitel osálení [-],

T_{pd} teplota dna zásobníku [°C],

T_{pp} teplota podlahy [°C].

6.1.1 Výsledný výpočetní model zásobník 398 I

Pro výpočet tepelné ztráty dna je nutné znát tyto parametry:

$$Nu = 1$$

$$\lambda_{vzduchu} = 0,0256 \text{ W/m}\cdot\text{K},$$

$$\varepsilon_{zásobníku} = 0,95,$$

$$\varepsilon_{podlahy} = 0,9,$$

$$\varphi_{1,2} = 0,5$$

Abychom mohli stanovit součinitel tepelné vodivosti tepelné izolace, je nutné znát její teplotu. Tu získáme upraveným vzorcem (3.1), podobné vzorce jsou použity i pro zjištění teploty povrchu vrstev dna viz model v příloze

$$T_{izol} = \frac{T_{pizol1} + T_{pizol2}}{2} \quad (7.4)$$

kde je

T_{pizol1} teplota vnitřní stěny izolace [°C],

T_{pizol2} teplota vnější strany izolace [°C].

$$T_{pizol1} = T_W - \frac{\Phi_1}{H} \cdot R_{S235JR} \quad (7.5)$$

kde je

T_W teplota vody uvnitř zásobníku [°C],

Φ_1 tepelná ztráta pláště zásobníku [W],

H výška zásobníku [m],

R_{S235JR} tepelný odpor vnitřní vrstvy pláště zásobníku (S235JR) [m·K/W].

$$T_{pizol2} = T_{amb} + \frac{\Phi_1}{H} \cdot (R_{he} + R_{PVC}) \quad (7.6)$$

kde je

T_{amb} teplota okolního vzduchu [°C],

$q_{1,2}$ tepelná ztráta pláště zásobníku na 1 m délky [W/m],

R_{PVC} tepelný odpor vnější vrstvy pláště zásobníku (PVC) [m·K/W],

R_e tepelný odpor na vnějšku pláště [m·K/W].

Lze si všimnout, že ve výsledném modelu dochází k iteraci, konkrétně mezi vzorcem (3.1), (7.5) a (7.6). Tepelná ztráta pláště zásobníku Φ_1 závisí na součiniteli tepelné vodivosti λ , ten závisí na teplotě izolace, která závisí na tepelné ztrátě pláště zásobníku. Iterace docílí ustálení takto na sebe závislých veličin.

Výsledky výsledného modelu byly získány pomocí vzorců z kapitoly 3.1.1 a 3.1.2. a 7.1 Tento model je uveden v příloze – excelu, který bude k práci přiložen. Porovnání tepelné ztráty samotného zásobníku získané experimentem a výsledným výpočetním modelem lze vidět v tabulce 7.1.

Tabulka 6.1. - Porovnání tepelné ztráty zásobníku 398 l stanovené experimentem a výpočtem

T_w [°C]	37	50	58	71
T_{amb} [°C]	22	22	22	22
ΔT [K]	15	28	37	49
Φ [W] – experiment	40	77	105	147
Φ [W] – výpočet	39	74	101	141

Z tabulky 7.1 je zřejmé, že pomocí výpočetního modelu lze získat velmi přesně hodnotu tepelné ztráty. Nejvyšší rozdíl mezi vypočtenou tepelnou ztrátou a stanovenou tepelnou ztrátou pomocí experimentu je 6 W.

6.1.2 Výsledný výpočetní model – zásobník 282 l

Pro výpočet tepelné ztráty dna je nutné znát tyto parametry:

$$\text{Nu} = 1$$

$$\lambda_{\text{vzduchu}} = 0,0256 \text{ W/m}\cdot\text{K},$$

$$\varepsilon_{\text{zásobníku}} = 0,95,$$

$$\varepsilon_{\text{podlahy}} = 0,9,$$

$$\varphi_{1,2} = 0,5$$

Pro výpočet tepelné ztráty zásobníku 282 l je použit stejný výpočetní model jako při výpočtu tepelné ztráty velkého zásobníku. Liší se pouze vstupní údaje, ty jsou uvedeny výše. Porovnání tepelné ztráty samotného malého zásobníku získané experimentem a výsledným výpočetním modelem lze vidět v tabulce níže.

Tabulka 6.2. - Porovnání tepelné ztráty zásobníku 282 l stanovené experimentem a výpočtem

T_W [°C]	36	48	57	68
T_{amb} [°C]	22	22	22	22
ΔT [K]	14	26	35	47
Φ [W] – experiment	43	84	115	158
Φ [W] – výpočet	46	85	118	160

Z tabulky 7.2 je opět zřejmé, že pomocí výpočetního modelu lze získat velmi přesně hodnotu tepelnou ztráty. Tentokrát nejvyšší rozdíl mezi vypočtenou tepelnou ztrátou a tepelnou ztrátou stanovenou pomocí experimentu činí pouze 3 W, při $T_W = 36$ °C činí tento rozdíl necelých 7 %.

6.2 Zásobník tepla s ventily

V této kapitole se uvažuje stejný výpočetní model jako v kapitole 7.1. Rozdíl oproti přechozímu modelu činí rozšíření o výpočet tepelné ztráty ventilů. K zásobníku byly připevněny kulové uzávěry vody – perfecta, velikosti „1“ z niklované mosazi. Podrobný výpočet tepelné ztráty ventilů je uveden v kapitole 4.1. Zjednodušeně se dá výpočet tepelné ztráty rozdělit na výpočet tepelné ztráty trubky, rozměry trubky jsou

aproximovány tak, aby se co nejvíce přibližovaly ke středním hodnotám rozměrů jednotlivých částí ventilu.

Druhá část výpočtu tepelné ztráty ventilů se provádí podle normy ČSN EN 12 241. Počet přidávaných ventilů se u obou zásobníků odlišuje. K zásobníku 398 l bylo připevněno 15 ventilů, k zásobníku 282 l pouze 8.

6.2.1 Výsledný výpočetní model s ventily

Tento výpočetní model je uveden v příloze – excelu, který je v příloze k práci. Rozdíly tepelné ztráty samotného zásobníku stanovené pomocí experimentu a výsledným výpočetním modelem jsou v níže uvedené tabulce.

Tabulka 6.3. - Porovnání tepelné ztráty obou zásobníků s ventily stanovené experimentem i výpočtem

Veličina	VZ + 8x ventil		MZ + 8x ventil	
T_w [°C]	37	62	35	57
T_{amb} [°C]	22	22	22	22
ΔT [K]	15	40	14	35
Φ [W] – experiment	70	203	56	160
Φ [W] – výpočet	70	207	58	162

Z tabulky je zřejmé, že rozdíl tepelných ztrát z experimentu a výpočtu se odlišuje minimálně. Nejvyšší rozdíl nastává u zásobníku 398 l při $T_w = 62$ °C a zaznamenává rozdíl 4 W u hodnoty tepelné ztráty 203 W. Takto malý rozdíl je zanedbatelný, při přepočtu na procenta činí necelá 2 %.

6.3 Zásobník tepla s trubkami

V této kapitole je použit výsledný výpočetní model z předchozích kapitol rozšířený o připojené vodorovné trubky (Cu22x1). Trubky měly na obou svých koncích čidla teploty. Ve výpočtu jsem uvažoval, že teplota vody uvnitř trubky je poměr teplot změřených na začátku a na konci trubky, konkrétně 1:2. Uvažoval jsem tedy, že ve většině svého objemu je trubka spíše vychladlá, jako na svém konci.

Výpočet tepelné ztráty trubky s izolací je stejný jako výpočet tepelné ztráty pláště zásobníku. Jednotlivé vrstvy přepojených izolovaných trubek mají tyto parametry:

1) Měď: $r_1 = 0,011$ m,

$$\lambda_1 = 339 \text{ W/m}\cdot\text{K.}$$

2) Izolace – PE:

$$\delta_2 = 0,0125\text{m,}$$

$$\lambda_2 = 0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K.}$$

Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu pláště a víka zásobníku je:

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K.}$$

6.3.1 Výsledný výpočetní model s přidanými trubkami

Tabulka 6.4. - Porovnání tepelné ztráty zásobníku 398 l s přidanými trubkami stanovené experimentem i výpočtem

Veličina	VZ s 2 trubkami		VZ s 4 trubkami	
T_w [°C]	37	62	37	62
T_{amb} [°C]	21	22	22	22
ΔT [K]	16	40	15	40
Φ [W] – experiment	73	204	71	217
Φ [W] – výpočet	77	215	73	222

Tabulka 6.5. - Porovnání tepelné ztráty zásobníku 282 l s přidanými trubkami stanovené experimentem i výpočtem

Veličina	MZ s 2 trubkami		MZ s 4 trubkami	
T_w [°C]	35	57	35	57
T_{amb} [°C]	21	22	22	22
ΔT [K]	14	35	14	35
Φ [W] – experiment	62	172	60	179
Φ [W] – výpočet	62	170	62	178

Z tabulky 7.4 a 7.5 je zřejmé, že výsledky mezi stanovenou tepelnou ztrátou podle experimentu se odlišují výrazněji od vypočtených hodnot oproti předchozím modelům. To je dáno tím, že při experimentu nebyly vždy trubky úplně vodorovné. Jejich mírný ohyb ovlivní či omezí vnitřní recirkulaci v potrubí, se kterou poté tepelná ztráta roste. V mém výpočetním modelu uvažuji všechny trubky dokonale vodorovné. Největší rozdíl mezi tepelnými ztrátami nastává u zásobníku 398 l při vysokých teplotách. Zde je rozdíl mezi experimentálně výpočtově stanovenou tepelnou ztrátou 12 W.

6.4 Výsledný zjednodušený vzorec

Vytvořený jednoduchý vzorec obsahuje výpočet tepelné ztráty Φ [W] samotného zásobníku, který lze modifikovat připojením libovolného počtu ventilů a trubek. Výhodou tohoto vzorce je snadná aplikovatelnost. Vytvoření výpočetního modelu z přechozí kapitoly je náročné a pro přesný výpočet je nutné znát podrobné vlastnosti vrstev pláště, víka a dna. Tento vzorec obsahuje pouze 4 vstupní parametry.

Prvním vstupním parametrem tohoto vzorce je tepelná ztráta Φ_E [W], která je uvedena na energetickém štítku a která se stanovuje při teplotním rozdílu $\Delta T = 45$ K. Z těchto hodnot lze stanovit měrnou tepelnou ztrátu UA [W/K] viz vzorec (3.4).

Druhým vstupním parametrem je teplotní rozdíl. Pomocí měrné tepelné ztráty a teplotního rozdílu, lze predikovat tepelná ztráta při jakémkoliv teplotním rozdílu viz kapitola 3.1.4.

Třetím vstupním parametrem je počet uzavíracích ventilů n , které mohou být k zásobníku připevněny. Tepelná ztráta jednoho ventilu využívá výsledků z kapitoly 4.1.3, které jsou ve výsledném zjednodušeném vzorci vztaženy k teplotnímu rozdílu.

Počet připevněných trubek k zásobníku k tvoří další člen výsledného vzorce. Tepelná ztráta se počítá pomocí dat z kapitoly 7.3.1 promítnutých do lineární závislosti vztažené opět k teplotnímu rozdílu mezi teplotou vody a teplotou okolního vzduchu.

Výsledný zjednodušený vzorec počítající tepelnou ztrátu zásobníků vypadá takto

$$\Phi = \frac{\Phi_E}{45} \cdot \Delta T + n \cdot (0,0658 \cdot \Delta T^{1,2458}) + k \cdot (0,06 \cdot \Delta T + 0,7052) \quad (7.8)$$

kde je

Φ_E tepelná ztráta uvedená na energetickém štítku [W],

ΔT teplotní rozdíl mezi teplotou vody uvnitř zásobníku [K],

n počet připevněných ventilů (velikosti „1“) k zásobníku [-],

k počet připevněných trubek (délky 1 m) k zásobníku [-].

Tento vzorec může být poupraven pro případ, kdy není k dispozici energetický štítek zásobníku. To se může hodit při návrhu zásobníku, když známe pouze objem zásobníku, ale ještě nevíme, jaký konkrétní typ vybereme. V tomto případě lze hodnotu Φ_E stanovit podle nařízení komise (EU) č. 814/2013, která udává nejvyšší přípustnou tepelnou ztrátu při $\Delta T = 45$ K zásobníku pro určitý objem viz vzorec (5.1). V tomto případě by výsledný zjednodušený vzorec vypadal

$$\Phi = \frac{16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4}}{45} \cdot \Delta T + n \cdot (0,0658 \cdot \Delta T^{1,2458}) + k \cdot (0,06 \cdot \Delta T + 0,7052) \quad (7.9)$$

kde je

V objem zkoumaného zásobníku.

7. Závěr

Z této diplomové práce, ve které se stanovila tepelná ztráta dvou vodních zásobníků pomocí experimentu, je zřejmé, že je třeba brát tepelnou ztrátu uváděnou na energetických štítcích s nadhledem. Při jejím stanovení se zpravidla všechny vývody od potrubí zazátkují a kvalitně zaizolují, aby výsledek nebyl zhoršen vlivem dodatkových tepelných ztrát. To však v praxi není reálné, neboť k tepelné soustavě i k rozvodu studené a teplé vody je zásobník připojen uzavíracími ventily a potrubím.

Rozdíl mezi měrnou tepelnou ztrátou samotného zásobníku 282 l a zásobníku s ventily a čtyřmi trubkami ohnutými nahoru činí při nízkých teplotách 1,93 W/K. Při vysokých teplotách vody činí rozdíl tepelné ztráty mezi takto osazenými malými zásobníky 2,22 W/K. V případě, ve kterém je uvažovaný $\Delta T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, činí tento rozdíl 86 W a 100 W. Pro porovnání tepelná ztráta samotného zásobníku tepla činí 117 W a 129 W, jedná se tedy o 73% a 78% nárůst tepelné ztráty. U zásobníku 398 l byl tento nárůst roven 140 W a 127 W. Porovnáním s původní stanovenou tepelnou ztrátou 133 W a 145 W se jedná o 105% a 88% nárůst tepelné ztráty.

V závěrečné části byl pro každý zásobník tepla vytvořen výpočetní model stanovující tepelnou ztrátu zásobníků tepla při různých podmínkách. Konkrétně při měnící se teplotě a při různém počtu připevněných ventilů a trubek. Výsledky tohoto modelu se seřídily pomocí hodnot z předešlého experimentu. Výpočet tepelné ztráty pomocí tohoto modelu probíhal u obou zásobníků tepla stejně. Lišil se pouze vstupními údaji (rozměry zásobníku tepla, typ tepelné izolace, tloušťka jednotlivých vrstev, výška a další). Tento výpočetní model je uveden v příloze.

Protože model stanovující tepelnou ztrátu zásobníku tepla zahrnuje poměrně složitý výpočetní postup, byl v závěru práce vytvořen zjednodušený model ve formě vzorce. Ten má pouze čtyři vstupní parametry, a to tepelnou ztrátu uváděnou na energetickém štítku Φ_E , teplotní rozdíl mezi teplotou vody a teplotou okolního vzduchu ΔT , počet připevněných ventilů n a počet připevněných trubek k . Výstupem tohoto modelu je tepelná ztráta akumulčního vodního zásobníku Φ [W]. Nabízí tak projektantům a energetickým specialistům pomůcku v náhledu na reálnou energetickou účinnost akumulace tepla.

8. Literatura

- [1] OSTRÝ, Milan, 2008. Akumulace tepla pro snížení spotřeby energie v nízkoenergetických budovách. TZB info [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/4643-akumulace-tepla-pro-snizeni-spotreby-energie-v-nizkoenergeticky-budovach>
- [2] DING, Yate a S. B. RIFFAT, 2012. Thermochemical energy storage technologies for building applications: A state-of- The- Art review. International Journal of Low-Carbon Technologies [online]. 2012, 8(2), 106-116 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/274164025_Thermochemical_energy_storage_technologies_for_building_applications_A_state-of-The-Art_review
- [3] DINCER, Ibrahim a ROSEN Mart A., 2012. Thermal energy storage systems and applications. 3. Canada: Willey. ISBN 978-0-470-74706-3 (cloth).
- [4] SARBU, Ioan, 2017. Solar thermal energy storage. Advances in Energy Research. [online]. June 2017, 2017(27), 65 - 75 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-030-64781-0_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64781-0_7)
- [5] MATUŠKA, Tomáš, 2019. Zásobníky tepla. In: Users.fs.cvut.cz [online]. Praha: ČVUT [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2019/03/AZE2_P4_zasobniky.pdf
- [6] GABRIEL, Vít, Storage water heaters & heat exchangers, 1n. 1. In: <https://www.reflex-winkelmann.com> [online]. Germany: Reflex [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: https://www.reflex-winkelmann.com/fileadmin/user_upload/pdf_en/PI1324en_9571358_Warmwasserspeicher-Waermeuebertrager.pdf
- [7] DIRIKEN, Jan a Al KOUSSA Jad, 2014. Short- and long-term thermal energy storage in a residential setting. Story [online]. Belgium: STORY, s. 1-10 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://horizon2020-story.eu/short-and-long-term-thermal-energy-storage-in-a-residential-setting/>

- [8] MATUŠKA, Tomáš 2018. Solární soustavy a tepelná čerpadla pro CZT. In: Users [online]. Praha: ČVUT [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/>
- [9] SINHA, Rakesh, BAK-JENSEN Birgitte a ZAREIPOUR Hamidreza, 2019. Flexibility from Electric Boiler and Thermal Storage for Multi Energy System Interaction. *Energies* [online]. Denmark, 13(98), 1-21 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: [doi:10.3390/en13010098](https://doi.org/10.3390/en13010098)
- [10] MATUŠKA, Tomáš, 2018. Solární kolektory. *TZB-Info* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/156-zasobniky-tepla-s-rizenym-teplotnim-vrstvenim-stratifikaci>
- [11] LAZIĆ, Vukić a ARSIĆ, Dušan, 2016. Selection and analysis of material for boiler pipes in a steam plant. *Procedia Engineering* [online]. Serbia: Procedia Engineering, 2016(149), 217-223 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.proeng.2016.06.659](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.659)
- [12] BARTÁK, Martin, 2011. Řešené příklady z přenosových jevů pro inteligentní budovy. 2. Praha.
- [13] DAĐOUREK, Karel, 2007. *Tepelná technika: Teorie tepelného zpracování*. Liberec.
- [14] C11000 Cu-ETP 0,03x20 mm Fólie z čisté mědi C1100, 2020. Hangzhou. Dostupné také z: <http://cz.alloystrip.com/pure-metal/copper/c11000-cu-etp-0-03x20mm-c1100-pure-copper.html>
- [15] HARICHANDRAN, R. a VIGNESH KUMAR, R., 2021. Experimental and numerical evaluation of thermal conductivity of graphene nanoplatelets reinforced aluminium composites produced by powder metallurgy and hot extrusion technique. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2022, 900(163401), 2-12 [cit. 2023-05-28]. ISSN 1873-4669. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838821048118>
- [16] MIRZABABAEI, SAEREH, V, VINNAY, K, DODDAPANEN, I a LEE Kijoon, 2023. Emarkable enhancement in thermal conductivity of stainless-steel leveraging metal composite via laser powder bed fusion: 316L-Cu composite. *Additive Manufacturing* [online]. 2023, 70(103576), 3-4 [cit. 2023-05-28]. ISSN 2214-7810. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860423001896>

- [17] KOENIGSREUTHER, Peter, 2020. Einzigartiger Wärmespeicher spart Ressourcen und CO2. In: Maschinenmarkt [online]. Germany: maschinenmarkt, 29.05.2020 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/einzigartiger-waermespeicher-spart-ressourcen-und-co2-a-936042/>
- [18] MARTINS, Marta, GOMES, Rui, PINA, Luís a PEREIRA, Celeste, 2018. Highly Conductive Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite Electronic Box: Out-Of-Autoclave Manufacturing for Space Applications: Smart Reinforced Composites Using Carbon and Carbon-Based Nanomaterials. Smart Reinforced Composites Using Carbon and Carbon-Based Nanomaterials) [online]. 2018(1), 1-10 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: doi:10.3390/fib6040092
- [19] OUARDI, WAHID Abderrazak a Achraf, 2022. Effect of residual stresses on the fracture of polypropylene (PPR) pipes. Theoretical and Applied Fracture Mechanics [online]. Morocco, 119(103330), 1-4 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844222000829>
- [20] KNY, Martin a URBAN Miroslav, 2014. Vodní zásobníky pro dlouhodobou akumulaci tepla. TZB-Info [online]. Praha: ČVUT, 2014, 1(1), . [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11358-vodni-zasobniky-pro-dlouhodobou-akumulaci-tepla>
- [21] MATUŠKA, Tomáš, 2015. Tepelné sítě - tepelné ztráty. Praha. Dostupné také z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=23
- [22] OCHS, F, HEIDEMANN W, 2008. Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von unterirdischen Langzeit-Wärmespeichern am Beispiel des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm. In: Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von unterirdischen Langzeit-Wärmespeichern am Beispiel des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm [online]. 1. Germany: OTTI, e.V., s. 2-6 [cit. 2023-05-27]. ISBN 978-3-934681-74-3. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225001173_Waermeleitfaehigkeit_der_Waermedaemmung_von_unterirdischen_Langzeit-Waermespeichern_am_Beiispiel_des_Erdsonden-Waermespeichers_in_Neckarsulml
- [23] WINKLER-SKALNA, Agnieszka, ŁOBODA, Beata, 2020. Journal of Building Engineering: Determination of the thermal insulation properties of cylindrical PUR foam

products throughout the entire life cycle using accelerated aging procedures [online]. 74. Poland: Elsevier BV [cit. 2023-05-27]. ISBN 23527102. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219327317#fig5>

[24] SAJID, L, AZMANI, O, EL AHMADI, Z, BENAYDA, A, GMOUTH, S. Extraction and characterization of palm fibers and their use to produce wool- and polyester-blended nonwovens. *Journal of Industrial Textiles*. 2021;51(2):177-205. doi:10.1177/1528083719877007

[25] LANG, Stephan, GERSCHITZKA, Markus, 2009 *Energy Procedia*. Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Materials for Thermal Energy Stores in Solar Thermal Systems [online]. 91. Germany: Elsevier BV, s. 172-181 [cit. 2023-05-27]. ISBN 18766102. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216302946?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7ca59760edfbb380

[26] Vyhláška č. 193/2007 Sb.: Vyhláška, kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu, 2007. In: . Praha: Ministerstvo průmyslu, ročník 2007, 193/2007. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-193>

[27] MATUŠKA, Tomáš, 2019. TEPELNÁ ZTRÁTA ZÁSOBNÍKU TEPLA. Praha.

[28] ČSN EN 12897:2016+A1:2020, 2020. Water supply – Specification for indirectly heated unvented (closed) storage water heaters. A1. UK: BSI Standards Limited 2020.

[29] ČSN EN 60379, 2004. Metody měření funkce elektrických akumulčních ohříváčů vody pro domácnost a podobné účely. 36 1060. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

[30] ČSN EN 15332, 2008. Kotle pro ústřední vytápění – Stanovení energetické náročnosti zásobníků na teplou vodu. 07 5306. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

[31] ČSN EN 12977-3, Tepelné solární soustavy a součásti – Soustavy stavěné na zakázku – Část 3: Metody zkoušení parametrů solárních zásobníků pro ohřev vody, ČAS 2009.

- [32] LANG, Stephan, GERSCHITZKA, Markus, 2009 Energy Procedia. Pipe Internal Recirculation in Storage Connections – An Unseen Efficiency Barrier [online]. 73. Germany: Elsevier BV, s. 341-349 [cit. 2023-05-27]. ISBN 18766102. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215014721?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7d58cbc62ca22794
- [33] ANDERES, E., FAN J., FURBO S. (2008). Heat Losses from Pipes Connected to Hot Water Storage Tanks. In: Goswami, D.Y., Zhao, Y. (eds) Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_406
- [34] ČSN EN ISO 12241, 2023. Tepelně izolační výrobky pro zařízení budov a průmyslové instalace - Pravidla výpočtu. 72 7006. Belgie: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [35] Kulový uzávěr vody - perfecta: FIV.8366, 2023. In: Ivar [online]. Nelahozeves: ivar, 2023 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.ivarcs.cz/katalog/vytapeni-ivartrio/kulovy-uzaver-voda-perfecta-p139599/>
- [36] KLIEM, Francis, STENWEG, Jan a ROCKENDIRF Gunter, 2014. Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation. In: Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH) [online]. 1. Germany: ISFH, s. 1-60 [cit. 2023-05-27]. ISBN 978-3-9816770-0-3. Dostupné z: https://www.proklima-hannover.de/infothek/studien/einrohrzirkulation/Waermeverluste_Einrohrzirkulation.pdf
- [37] Kulové zpětné ventily, 2018. In: Tameson.de [online]. Germany: Tameson, 2023 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://tameson.de/pages/kugelruckschlagventile>
- [38] GRIESBACH, Matthias, 2008. Kulové zpětné ventily. In: Wiki [online]. Germany: Tameson [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCckschlagarmatur#/media/Datei:Rueckschlagventil_schaubild.jpg
- [39] [STREICH, Martin, 2013. Gegen Wärme-Wanderschaft. <https://www.sbz-monteur.de/> \[online\]. Ger: SBZ \[cit. 2023-05-27\]. Dostupné z: <https://www.sbz-monteur.de/gut-zu-wissen/gegen-waerme-wanderschaft>](https://www.sbz-monteur.de/)

[40] REFTELE, 2012. Have we forgotten to make heat traps?. No. 1. in hydronic system control. Sweden: ESBE AB, 1(330 21), 1-4.

[41] NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU): kterým se doplňuje směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/30/EU, pokud jde o uvádění spotřeby energie na energetických štítcích ohřivačů vody, zásobníků teplé vody a souprav sestávajících z ohřivače vody a solárního zařízení, 2013. In: . Belgie: Evropská komise, ročník 2013, 812/2013.

[42] NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU): kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign ohřivačů pro vytápění vnitřních prostorů a kombinovaných ohřivačů, 2013. In: . Belgie: Evropská komise, ročník 2013, 813/2013.

[43] NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU): kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign ohřivačů vody a zásobníků teplé vody, 2013. In: . Belgie: Evropská komise, ročník 2013, 814/2013.

9. Přílohy



Obrázek 9.1. - Samotný zaizolovaný zásobník 398 l



Obrázek 9.2. - Samotný zaizolovaný zásobník 282 l



Obrázek 9.3. - Zásobník 398 l s ventily



Obrázek 9.4. - Zásobník 282 l s ventily



Obrázek 9.5. - Zásobník 398 l s ventily a dvěma trubkami



Obrázek 9.6. - Zásobník 282 l s dvěma trubkami



Obrázek 9.7. - Zásobník 398 s ventily a čtyřmi trubkami



Obrázek 9.8. - Zásobník 282 l s ventily a čtyřmi trubkami



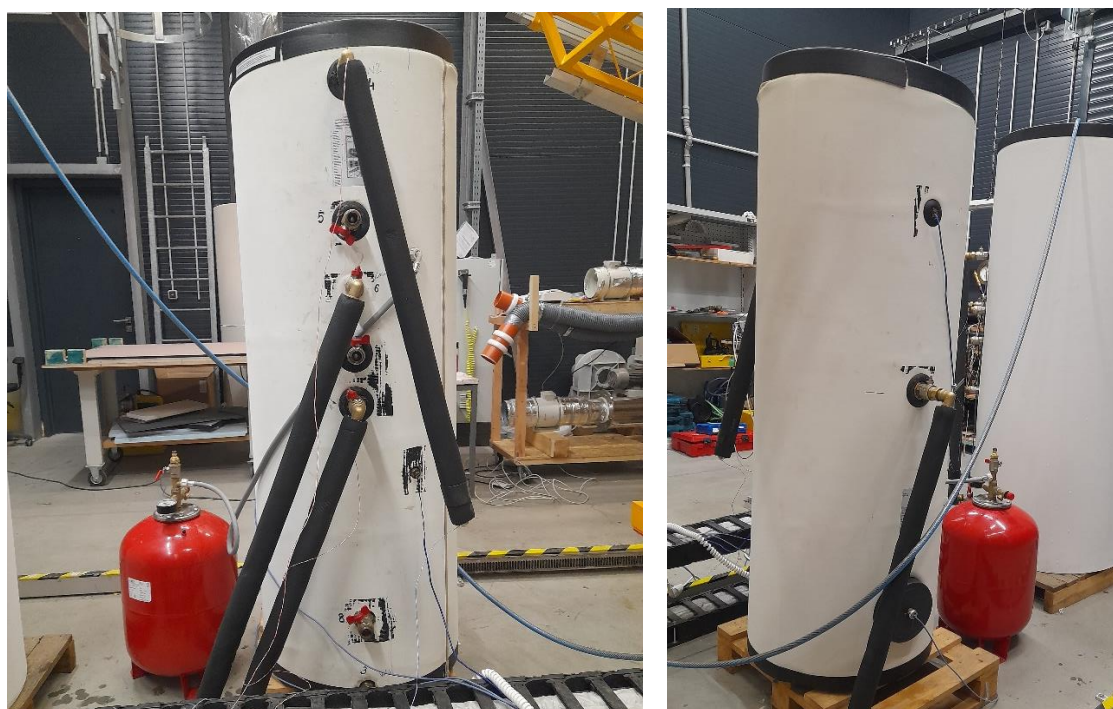
Obrázek 9.9. - Zásobník 398 l s ventily a čtyřmi trubkami ohlými nahoru



Obrázek 9.10. - Zásobník 282 l s ventily a čtyřmi trubkami ohlými nahoru



Obrázek 9.11. - Zásobník 398 l s ventily a čtyřmi trubkami ohlými dolu



Obrázek 9.12. - Zásobník 282 l s ventily a čtyřmi trubkami ohlými dolu